

공동주택 방사성물질 저감을 위한 필름형 재료 적용방안 평가

연구관리 2024-085호

공동주택 방사성물질 저감을 위한 필름형 재료 적용방안 평가

지은이 박정하, 이병희, 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

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 방사성물질 저감을 위한 필름형 재료 적용방안 평가

Assessment of thin-film membranes as a passive barrier
to radon gas diffusion in apartments

박정하·이병희·양영권·김선동·장대성·김찬누리

LH 토지주택연구원

참여연구진

연구책임

박정하 LH 토지주택연구원 수석연구원

연구진

이병희 LH 토지주택연구원 수석연구원

양영권 LH 토지주택연구원 책임연구원

김선동 LH 토지주택연구원 연구원

장대성 LH 스마트주택기술처 차장

김찬누리 LH 스마트주택기술처 과장

연구심의위원

전주영 LH 토지주택연구원 건설기술연구실장

엄영준 LH 스마트주택기술처 팀장

박영준 LH 안전기획처 차장

박진철 중앙대학교 교수

정경재 서울대학교 교수

이윤규 한국건설기술연구원 선임연구위원

위탁연구용역 연구진

강동화 서울시립대학교 교수

구자빈 서울시립대학교 연구원

신희원 서울시립대학교 연구원

곽영훈 서울시립대학교 연구원

정효범 서울시립대학교 연구보조원

김지민 서울시립대학교 연구보조원

한재현 서울시립대학교 연구보조원

■ 건축 재료로부터 발생하는 라돈 관리의 필요성

「실내공기질 관리법」 개정에 따라 2018년 이후 신규 사업승인을 받은 신축 공동주택의 실내 라돈 측정이 의무화되면서 권고 기준(148 Bq/m^3) 초과 세대의 사후 라돈 관리 방안의 필요성 대두

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

■ 필름형 재료를 이용한 방사성물질 방출 저감 가능성

공동주택의 실내 공기 중 존재하는 라돈은 콘크리트와 같은 건축 재료의 표면에서 방출하여 실내로 이동하기 때문에 라돈의 실내 유입을 억제하기 위한 재료의 적용이 필요

- 선행연구에 따르면, 콘크리트 표면에 일부 도료 적용시 라돈 방출 저감 효과가 있는 것으로 분석되었으나 도료의 경우 TVOC, HCHO 등 다른 실내공기 오염물질 문제가 발생할 수 있어 실내 사용에 제한적임
- 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 평가하고, 현장 적용 가능성을 검토하는 것이 바람직함

■ 필름형 재료의 선정 및 품질특성 분석

기밀, 단열, 방수를 목적으로 시중에 유통중인 건축자재 중 재료의 두께, 단가, 시공성 등을 고려하여 4종의 필름형 재료를 선정

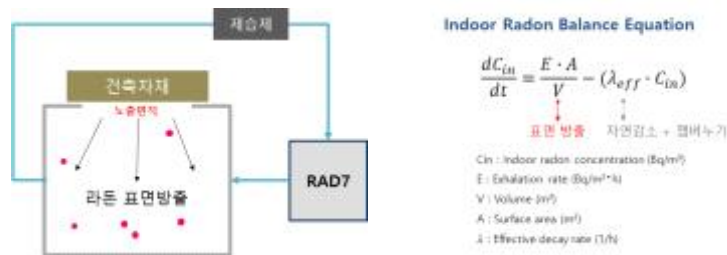
- 선행연구에 따르면 라돈 투과 저항성[R, Resistance] (s/m , Ms/m)은 $\text{PU} < \text{HDPE} < \text{PP} < \text{PE}$, $\text{AL} < \text{EVOH}$ 순으로 높음
- 선정된 4종의 재료 : 1) 단열필름(복사차단재, AL), 2) 방수필름(투습방습용, PP+PP), 3) 기밀 필름(내부기밀용 투습방습지, PP+PE), 4) PE필름(PE)

- 필름형 재료의 품질 특성은 산소투과도(ASTMF 1927, 20°C/ 60%)를 측정하였으며, 결과는 단열필름> PE 필름 > 기밀, 방수 필름 순

■ 건축재료 표면의 라돈농도 측정 및 표면 라돈방출량 평가 방법

건축재료 표면에서 발생하는 라돈 방출량을 측정하는 표준 시험법은 아직 정립되어 있지 않으며, 본 연구에서는 밀폐형 구조의 챔버 방식을 활용

- RAD7을 이용하여 밀폐 챔버 내 라돈 농도를 측정한 뒤, 일정 시간이 지난 후의 챔버 내 라돈 포화 농도를 활용하여 표면에서의 라돈 방출량을 추정

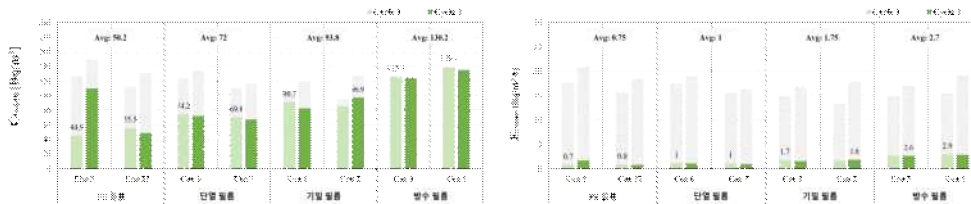


[그림 1] 밀폐형 챔버를 이용한 건축 재료 표면 라돈 방출 실험

■ 시편을 이용한 필름형 재료의 라돈 방출 측정

콘크리트 시편(200×200×50(mm))에 4종의 필름형 재료 부착 전/후의 밀폐 챔버 라돈 농도 (Bq/m³) 측정 및 표면 라돈 방출량(Bq/m²·h) 도출

- 1개 재료당 2개의 시편을 대상으로 2회 반복하여 [1단계] 시편 자체 → [2단계] 시편 위 필름형 재료 부착 후 → [3단계] 시편과 필름형 재료 위 벽지 부착 후 3단계로 측정



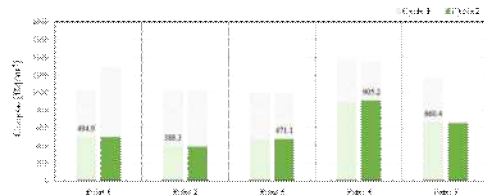
[그림 2] 벽지 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도 [그림 3] 벽지 시공 후 표면 라돈 방출량

- 벽지 부착 후(3단계) 밀폐 챔버 내 평균 라돈 농도의 저감률은 PE필름 64%, 단열 필름 43%, 기밀필름 24%로 나타났으며 방수필름은 1% 증가하였음. 이때, 저감률이 가장 높은 PE필름의 표면 방출률은 97%로 추정
- 모든 Case에서 벽지 시공 후 밀폐 챔버내 라돈 농도가 증가하는 추세로 나타났으며 이는 벽지 시공에 따른 습윤 상태였기 때문으로 판단됨

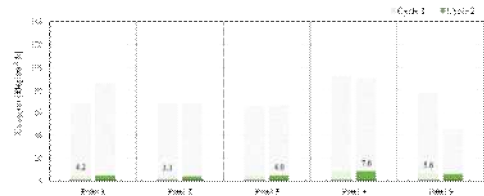
■ 실물벽체를 이용한 라돈 방출 Mock-up 실험

시험실험 결과 방출저감률이 가장 우수한 PE필름을 대상으로 실물크기(2.25×3×0.2m) 벽체에서 필름형 재료 시공 전/후의 밀폐챔버 내 라돈 농도 측정 및 표면 방출량 도출

- 항온항습 조건(25°C, 50%) 유지 가능한 외단열 챔버에 실물크기 벽체를 부착하고 내부 노출면의 콘크리트 표면 5개 지점에서 [1단계] 실물벽체 자체 → [2단계] 벽체 위 필름형 재료 시공 후 → [3단계] 필름형 재료 위 벽지 시공 후 3단계로 측정(2회 반복)
- PE필름과 벽지 시공에 따라 기존 실물벽체 대비 밀폐챔버 라돈 농도 기준 51%, 표면 라돈 방출량 기준 94%의 라돈 방출 저감률을 나타냄
- Mock-up 외단열 챔버 내 실내 공기중 평균 라돈 농도는 PE필름 시공 전 $78.3 \pm 13.1 \text{ Bq/m}^3$, PE필름 및 벽지 시공 후 $70.4 \pm 16 \text{ Bq/m}^3$ 으로 평형시간 120시간 기준 최대 25%의 저감률을 나타냄



[그림 4] 벽지 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도

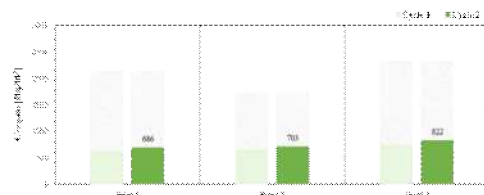


[그림 5] 벽지 시공 후 표면 라돈 방출량

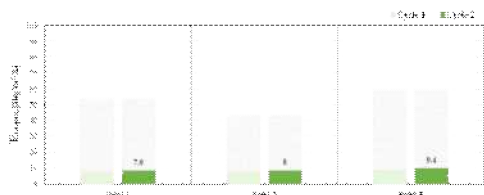
■ 소형 공동주택에서의 라돈 방출 현장 실험

26㎡ Type 1세대를 대상으로 실내 라돈 농도에 가장 기여도가 높고 시공이 용이한 좌우측 내력벽(4.7×2.3m, 3.6×2.3m)에 PE필름을 시공하며, 시공 전/후의 밀폐챔버 내 라돈 농도 측정 및 표면 방출량 도출

- 3개 지점에서 [1단계] 기존 벽지 철거전 → [2단계] 기존 벽지 철거 후 벽체 자체 → [3단계] 필름형 재료 시공 후 → [4단계] 필름형 재료 위 벽지 시공 후 4단계에 따라 측정(2회 반복)



[그림 6] 벽지 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도



[그림 7] 벽지 시공 후 표면 라돈 방출량

- PE필름과 벽지 시공(4단계)에 따라 기존 벽지 철거후(2단계) 대비 밀폐챔버 라돈 농도

기준 64%, 표면 라돈 방출량 기준 84%의 라돈 방출 저감률을 나타냄

- 측정 세대의 실내 공기중 라돈 농도는 평형시간 48시간 기준으로 벽체자체 460 Bq/m³에서 PE필름 및 벽지 시공 후 336 Bq/m³으로 27%의 저감률을 나타냄

■ 필름형 재료를 이용한 공동주택 라돈 농도 저감 제안

본 연구 수행 결과, 라돈농도 저감을 위해 실내 전체 표면적 대비 25%의 면적에 해당하는 좌우 측벽 19m²에 필름형 재료인 PE필름을 시공한 경우, 시공된 위치에서의 표면 라돈 방출량 저감은 84%이며 실제 세대 내 실내 공기 중 라돈 농도는 25~27% 저감이 가능한 것으로 나타남

- 기준치를 초과한 세대 중 대부분을 차지하는 200 Bq/m³ 이내의 실내 라돈농도를 보이는 세대에 적용할 경우 기준치 이내로 실내 라돈농도의 관리가 가능할 것으로 판단됨
- 추가적으로 내력벽 외 부위에 대한 측정 및 검증을 통해 적용 부위를 확대하거나, PE 필름의 두께를 증가시키는 등 저감 효과를 높이기 위한 방안에 대한 분석이 추가로 요구됨

■ 본 연구에서의 한계점 및 향후 연구수행의 필요성

본 연구과제에서는 PE필름과 같은 필름형 재료의 시편, 실물벽체 Mock-up 실험, 소형공동주택 현장에서 적용을 통해 라돈 저감 성능에 대해 확인하였으나 기체투과도가 낮은 특성상 실내 벽체 적용에 따라 습환경 변화 등 실내공기 및 온열환경에 영향을 미칠 수 있어 이에 대한 확인이 필요 또한, 기존 PVC벽지 등 필름형 재료와 유사한 특성을 갖는 재료부터 타일, 보드, 단열재 등 기존 실내마감재의 실제 실내마감시공 조합에 따른 시공시 표면 라돈 방출량 저감성능을 확인하고, 이를 고려한 종합적인 적용방안의 제시가 필요함

주제어

방사성물질, 필름형 재료, 라돈 방출량, 밀폐형 챔버 실험, 건축 재료

차례 Contents

제1장 서론

- 1. 연구의 배경 및 목적 ————— 1
- 2. 연구 범위 및 내용 ————— 5

제2장 선행연구 고찰 및 필름형 재료 선정

- 1. 기존 선행연구 고찰 ————— 8
- 2. 필름형 재료 조사 및 선정 ————— 14
- 3. 필름형 재료 품질특성 분석 ————— 18

제3장 필름형 재료의 방사성물질 측정 방법 및 적용방안

- 1. 필름형 재료의 방사성물질 측정방법 선정 ————— 19
- 2. 필름형 재료의 적용방안 ————— 25

제4장 필름형 재료의 방사성물질 방출량 측정실험

- 1. 시편을 이용한 필름형 재료의 방사성물질 방출량 측정실험 ————— 28
- 2. 실물벽체를 이용한 필름형 재료의 방사성물질 방출 Mock-up 실험 ————— 47
- 3. 소형 공동주택에서 필름형 재료의 방사성물질 방출량 현장 실험 ————— 66
- 4. 소결 ————— 90

제5장 결론

- 1. 필름형 재료를 이용한 실내 라돈 관리방안 제안 ————— 92
- 2. 연구결과 종합 및 한계점 ————— 96

참고문헌

- 참고문헌 ————— 99

표 차례 List of Tables

[표 2-1] 필름형 재료의 라돈확산 계수	12
[표 2-2] 필름형재료의 라돈 저감성능 관련 선행연구 내용	13
[표 2-3] 필름형 재료 선정 기준	14
[표 2-4] 필름형 재료 조사 내용	15
[표 2-5] 평가대상 필름형 재료 선정 결과	17
[표 2-6] 필름형 재료의 산소투과도 측정 결과	18
[표 3-1] 신축공동주택의 실내공기중 라돈 농도 측정 조건 및 개요	24
[표 4-1] 콘크리트 시편 부착 Case	30
[표 4-2] 밀폐 챔버 공기 교환율 측정 결과	34
[표 4-3] 시편 활용 필름형 재료 라돈 방출 측정 결과 종합	45
[표 4-4] 가·감압법에 의한 Mock-up 기밀도 측정 결과	52
[표 4-5] 실물벽체 Mock-up에서의 필름형 재료 라돈 방출 측정 결과 종합	64
[표 4-6] 가·감압법에 의한 소형공동주택 기밀성능 측정 결과	69
[표 4-7] 소형 공동주택 활용 필름형 재료의 라돈 방출 측정 결과 종합	87
[표 4-8] 평형 시간 기준 단계별 세대 내 공기 중 라돈 농도	88
[표 4-9] 시편,Mock-up,현장 실험에서의 필름형 재료 적용에 따른 단계별 밀폐챔버 라돈 농도 및 표면 라돈 방출량 비교	90
[표 4-10] PE필름 시공 이후 3개월간 시공면에서의 표면 라돈 방출량 측정 결과	91
[표 5-1] 시공 및 측정 단계별 실내 라돈농도 측정 결과	93

그림 차례 List of Figures

[그림 1] 밀폐형 챔버를 이용한 건축 재료 표면 라돈 방출 실험	2
[그림 2] 벽지 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도	2
[그림 3] 벽지 시공 후 표면 라돈 방출량	2
[그림 4] 벽지 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도	3
[그림 5] 벽지 시공 후 표면 라돈 방출량	3
[그림 6] 벽지 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도	3
[그림 7] 벽지 시공 후 표면 라돈 방출량	3
[그림 1-1] 공동주택 라돈관리 시스템	5
[그림 1-2] 연구 내용 및 방법	7
[그림 2-1] 필름형 재료별 산소투과도 시험 성적서	18
[그림 3-1] 라돈 발생원에서의 방사·수송·방출	19
[그림 3-2] 건축 재료 표면 라돈 방출량 평가방법 개요	20
[그림 3-3] 라돈 농도 누적 그래프	20
[그림 3-4] 밀폐 챔버를 이용한 시편 밀폐 챔버 내 라돈 농도 측정 방법	23
[그림 3-5] 소형공동주택의 라돈 저감 우선 시공 부위(단열재가 부착되지 않은 내력벽)	25
[그림 3-6] 벽체 도배시공(봉투붙임) 개념	26
[그림 3-7] 필름형 재료 시공 1단계(실리콘 도포)	27
[그림 3-8] 필름형 재료 시공 2단계(필름형 재료 부착)	27
[그림 3-9] 필름형 재료 시공 3단계(테이프 4면 부착)	27
[그림 4-1] 콘크리트 시편 적용(1단계)	28
[그림 4-2] 필름형 재료 부착(2단계)	28
[그림 4-3] 벽지 부착(3단계)	28
[그림 4-4] 콘크리트 시편을 이용한 실험 프로세스	29
[그림 4-5] 6가지 부착 case에 대한 초기 라돈 농도 분포	31

[그림 4-6] 시편 실험 환경 구축	32
[그림 4-7] 실험 기간 동안의 실험실 실내 온습도 분포	33
[그림 4-8] 실험 기간 동안의 실험실 실내 공기 중 라돈 농도 분포	33
[그림 4-9] 밀폐 챔버 기밀도 측정 방식	34
[그림 4-10] 콘크리트 시편 1-2의 밀폐 챔버 내 라돈 농도	36
[그림 4-11] 콘크리트 시편 3-4의 밀폐 챔버 내 라돈 농도	36
[그림 4-12] 콘크리트 시편 5-6의 밀폐 챔버 내 라돈 농도	37
[그림 4-13] 콘크리트 시편 7-8의 밀폐 챔버 내 라돈 농도	37
[그림 4-14] 콘크리트 시편 9-10의 밀폐 챔버 내 라돈 농도	37
[그림 4-15] 콘크리트 시편 11-12의 밀폐 챔버 내 라돈 농도	37
[그림 4-16] 12개 콘크리트 시편의 밀폐 챔버 내 라돈 농도 종합	38
[그림 4-17] 선정된 8개 콘크리트 시편 라돈 표면 방출량 종합	39
[그림 4-18] 필름형 재료 부착 및 측정	39
[그림 4-19] PE 및 단열 필름 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도	40
[그림 4-20] 기밀 및 방수 필름 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도	40
[그림 4-21] 필름형 재료별 밀폐 챔버 내 라돈 농도 종합	41
[그림 4-22] 필름형 재료별 표면 라돈 방출량 종합	41
[그림 4-23] 필름형 재료 및 벽지 시공	42
[그림 4-24] PE 및 단열필름 위 벽지 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도	43
[그림 4-25] 기밀방수 및 방수필름 위 벽지 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도	43
[그림 4-26] 필름형 재료별 벽지 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도 종합	44
[그림 4-27] 필름형 재료별 벽지 시공 후 표면 라돈 방출량 종합	44
[그림 4-28] 실물 크기 벽체를 이용한 실험 프로세스	47
[그림 4-29] LH 주택성능연구개발센터 內 외단열 기후변화 챔버 Mock-up	48
[그림 4-30] 밀폐 챔버 부착 방식	49
[그림 4-31] Mock-up 실물 크기 벽체 측정 지점	50
[그림 4-32] Blower Door를 이용한 Mock-up 기밀도 측정	51
[그림 4-33] 회차별 가압 및 감압에 따른 차압-풍량 측정	52
[그림 4-34] INNOVA 계통도	53
[그림 4-35] INNOVA 실험 사진	53
[그림 4-36] 챔버 미가동 조건에서의 실시간 공기 교환율	54

[그림 4-37] 챔버 가동 조건에서의 실시간 공기 교환율	54
[그림 4-38] Mock-up 실내 공기 중 라돈 농도 측정 결과	55
[그림 4-39] Mock-up 실내 온습도 측정 결과	55
[그림 4-40] 실물 크기 벽체 자체 측정 지점별 밀폐 챔버 내 라돈 농도	56
[그림 4-41] 실물 크기 벽체 자체 밀폐 챔버 내 라돈 농도 종합	57
[그림 4-42] 실물 크기 벽체 자체 표면 라돈 방출량 종합	57
[그림 4-43] Mock-up PE 필름 시공 및 챔버 부착	58
[그림 4-44] PE 필름 시공 후 측정 지점별 밀폐 챔버 내 라돈 농도	59
[그림 4-45] PE 필름 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도 종합	60
[그림 4-46] PE 필름 시공 후 표면 라돈 방출량 종합	60
[그림 4-47] Mock-up 벽지 시공 및 챔버 부착	61
[그림 4-48] PE 필름 및 벽지 시공 후 측정 지점별 밀폐 챔버 내 라돈 농도	62
[그림 4-49] PE 필름 및 벽지 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도 종합	63
[그림 4-50] PE 필름 및 벽지 시공 후 표면 라돈 방출량 종합	63
[그림 4-51] 단계별 Mock-up 공기 중 라돈 농도	65
[그림 4-52] 소형 공동주택을 이용한 실험 프로세스	66
[그림 4-53] 대상 소형 공동주택	67
[그림 4-54] 측정 세대 밀폐 환경 구축	68
[그림 4-55] PE필름 시공 및 측정위치	68
[그림 4-56] Blower Door를 이용한 소형공동주택 기밀성능 측정	69
[그림 4-57] INNOVA 실험	70
[그림 4-58] 측정 세대 실시간 공기 교환율	70
[그림 4-59] 실내외 환경 측정	71
[그림 4-60] Weather station 측정값 검증	72
[그림 4-61] 기존 벽체 표면 라돈 방출량 측정	73
[그림 4-62] 기존 상태에서의 공기 중 라돈 농도 측정값	73
[그림 4-63] 기존 벽체 측정 지점별 밀폐 챔버 내 라돈 농도	74
[그림 4-64] 기존 벽체 표면 라돈 방출량 종합	74
[그림 4-65] 벽지 철거 후 벽체 표면 라돈 방출량 측정	75
[그림 4-66] 실내 공기 중 농도 및 환경인자 측정값 (1차)	76
[그림 4-67] 실내 공기 중 농도 및 환경인자 측정값 (2차)	76

[그림 4-68] 벽지 철거 후 측정 지점별 밀폐 챔버 내 라돈 농도	77
[그림 4-69] 벽지 철거 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도 종합	78
[그림 4-70] 벽지 철거 후 표면 라돈 방출량 종합	78
[그림 4-71] PE 필름 시공 후 벽체 표면 라돈 방출량 측정	79
[그림 4-72] 실내 공기 중 농도 및 환경인자 측정값 (1차)	80
[그림 4-73] 실내 공기 중 농도 및 환경인자 측정값 (2차)	80
[그림 4-74] PE 필름 시공 후 측정 지점별 밀폐 챔버 내 라돈 농도	81
[그림 4-75] PE 필름 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도 종합	82
[그림 4-76] PE 필름 시공 후 표면 라돈 방출량 종합	82
[그림 4-77] PE 필름 및 벽지 시공 후 벽체 표면 라돈 방출량 측정	83
[그림 4-78] 실내 공기 중 농도 및 환경인자 측정값 (1차)	84
[그림 4-79] 실내 공기 중 농도 및 환경인자 측정값 (2차)	84
[그림 4-80] PE 필름 및 벽지 시공 후 측정 지점별 밀폐 챔버 내 라돈 농도	85
[그림 4-81] PE 필름 및 벽지 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도 종합	86
[그림 4-82] PE 필름 및 벽지 시공 후 표면 라돈 방출량 종합	86
[그림 4-83] 단계별 소형 공동주택 세대 내 공기 중 라돈 농도	88
[그림 5-1] 시공 및 측정단계별 실내 라돈농도 측정 결과 비교	93
[그림 5-2] 세대 내 공기 중 라돈 농도 예측 검증 결과	95

제1장 서론

1. 연구의 배경 및 목적

1.1. 연구추진 배경

1) 실내 거주시간 증가와 라돈의 위해성

인간은 하루 중 대부분의 시간을 실내에서 보낸다. 최근 호흡기 감염병인 코로나바이러스(SARS-CoV-2)의 전 세계적인 대유행 이후 예전보다 더 많은 사람들이 재택근무, 온라인 교육, 홈트레이닝 등으로 실내 거주 시간이 증가¹⁾하는 추세에 있는데, 탄소 중립 실현을 위해 제로에너지 정책 추진에 따라 공동주택의 기밀성능은 지속적으로 강화되고 있어 실내공기질 관리가 소홀할 경우 환기 부족 등으로 실내공기 오염물질 권고기준 초과가 우려되는 상황이다. 따라서 재실자의 실내 오염물질에 대한 노출 위험은 나날이 높아지고 있으며, 건강한 실내환경을 위해 실내공기 오염물질 관리의 중요성이 더욱 절실해지고 있다.

실내공기 오염물질에는 미세먼지, 휘발성 유기화합물, 폼알데하이드 등 다양한 종류가 존재하며, 이중 라돈은 반감기가 3.8일인 무색, 무취, 무미한 특징을 갖는 방사능 계열의 불활성 기체로 국제암연구센터(IARC)에서는 건강 및 인체 유해성 측면에서 1급 발암물질로 규정하고 있는 대표적인 실내공기 오염물질이다.

일반적으로는 주택 내 실내 공기중 라돈의 주 발생원으로는 토양 및 암석, 지하수 등 실외 요인에 의해 발생하는 라돈이 건물의 외벽 또는 바닥의 틈새나 배관 등으로 실내로 유입되는 것으로 알려져있다. 다만 우리나라에서는 단독주거보다 고층의 집합주거 형태인 공동주택이 78%를 차지²⁾하기 때문에 토양이나 지하에서 유입되는 라돈 보다 실내에서 방출되는 라돈의 양을 간과할 수 없다. 실제로 고층 공동주택에서도 라돈 농도가 높은 세대가 존재하며 이 콘크리트와 골재, 석재 등 라돈

1) Lee,J.Y.,Kang,S.G.(2021), "Prediction of Indoor Concentration through the Exhalation from Korean Yellow Residual Soil, Hwangtoh as a Building Material", *J.Korean Wood Sci. Technol.*, 49, 122-133.

2) 대한민국 정책브리핑, 2021 인구주택총조사(전수) 결과 일부 발췌, 2022.07.28..

방출원인 토양 및 암석을 주요 구조재와 마감재 등으로 사용하는 우리나라 공동주택 특성에서 기인하기 때문으로 추정된다. 따라서 라돈으로부터 안전한 실내환경 조성을 위해서는 건축 재료로부터 발생하는 라돈의 실내 유입을 반드시 해결해야 한다.

2) 공동주택 실내 라돈농도 관리 현황

현재 우리나라의 공동주택 실내 라돈 관리는 실내공기질 관리법³⁾에 따른다. 환경부는 2018년 이후 신규사업승인을 받은 신축 공동주택은 실내 라돈 농도 측정이 의무화 되었으며, 2019년 7월 1일부터 공동주택(신축 및 기존주택 포함)의 소유자 등에게 권고하는 실내 라돈 농도의 권고 기준을 148 Bq/m^3 로 규정하여 관리하고 있다. 또한, 2024년 2월부터는 신축공동주택 공기질 측정시 입주예정자 등이 입화하는 등 측정 기준이 강화되고 있어 신축공동주택의 실내공기오염물질 저감을 위한 관리방안의 필요성이 더욱 증대되고 있다.

한편, 2019년 환경부에서는 2018년 11월부터 2019년 5월까지 입주 전 신축 공동주택 9개 단지, 60세대 대상으로 「신축공동주택 라돈조사 결과」⁴⁾를 시행하였는데 60세대 중 37세대(61.7 %)에서 권고기준 148 Bq/m^3 을 초과하고 있었으며 환기가 되지않는 조건에서 기준치의 4배인 최대 533.5 Bq/m^3 을 초과하는 것으로 나타났다. 본 조사는 60세대 시범조사로 일반화하기에는 측정 세대 수가 적다는 것과 단지별 사업승인 시점에 따라 권고기준 적용 여부가 동일하지 않다는 점 등의 한계가 있음에도 불구하고 공동주택에서의 실내 라돈 관리 문제가 간과하기 어렵다는 점이 밝혀졌다는 데에 의의가 있다.

「건축법령」⁵⁾ 및 「주택법령」에 따라 2006년 이후 100세대 이상 신축공동주택은 시간당 0.5회 이상 환기성능의 환기설비가 의무적으로 설치되어 있다. 환경부 조사에서도 환기설비 가동조건에서는 라돈 농도가 크게 감소하는 것이 확인되었으나, 다만 공동주택 내 설치된 환기설비 운영이 의무화가 아니며 밀폐 시에는 실내 라돈 권고기준 초과가 우려되는 상황이다.

우리나라 공동주택에서 발생하는 라돈 문제의 주요 원인은 콘크리트 등 건축재료로부터의 요인이 큰 비중을 차지한다. 이와 관련하여 LH에서는 건축 재료로부터

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

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

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

방출하는 방사성물질 문제를 해결하기 위해 「건축자재 방사성물질 저감 가이드라인」(‘19.09. LH 고객품질혁신단)을 발표⁶⁾하였다. 가이드라인에 따르면 건축자재 7종(콘크리트(골재 포함), 벽돌, 도기, 타일, 몰탈, 석고보드, 석재)을 대상으로 재료 내 존재하는 방사성물질의 농도지수(I)를 이용한 관리 기준($I < 1$)을 제시하였으며, 일부 건축 재료에 대해서는 라듐 농도를 130 Bq/kg 이하로 관리하도록 권장하고 있다.

한편 정부에서는 환경부, 국토교통부, 원자력안전위원회 등 관계부처 공동으로 「건축자재 라돈 저감 관리 지침서」(‘19.11)⁷⁾를 발표한 바 있다. 본 지침에서는 공동주택에 사용되는 건축 재료 중 천연석 기반 자재를 중심으로한 내장재에 대해 방사성물질 농도인 방사능 농도 지수($I < 1$)를 이용한 건축 내장재의 라돈 관리 지침을 수립하였다.

그러나 LH의 가이드와 정부 관계부처 합동의 지침 모두 건축 재료 내 존재하는 천연방사성 핵종 농도를 이용한 간접 관리 방식으로 가스 상 물질인 라돈을 직접적으로 관리, 제어하는 방법은 아니며, 농도지수가 관리기준 이하인 재료를 사용하더라도 밀폐상태에서의 라돈 농도는 초과할 수 있다. 따라서 밀폐 상태에서의 실내 라돈 권고 기준 초과 문제를 해결하기 위해서는 건축 재료로부터 발생하여 실내로 유입되는 라돈을 직접 관리하는 방식이 필요하다.

결국 환기 등 외부 공기의 유입을 제외한 조건에서 실내 라돈 농도를 저감시키기 위한 가장 효과적인 방법은 오염원을 제어하는 것이며, 실내로 라돈을 방출하는 건축 재료의 사용량을 줄이거나 라돈 발생이 적은 대체 재료를 활용해야 한다. 그러나 무기질 계열의 건축 재료에서 방출되기 때문에 시멘트, 자갈, 모래로 구성된 콘크리트에 대한 사용량 감소나 대체가 필요한데 현재 공동주택에서는 현실적으로 어려움이 있다.

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. 따라서 본 연구에서는 시공이 용이하고 재료 조달이 비교적 쉬운 마감재인 필름형 재료를 대상으로 라돈의 관리방안을 제안하고자 한다.

6) LH 고객품질혁신단(2019), 건축자재 방사성물질 저감 가이드라인, 한국토지주택공사

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

1.2. 연구 목적

LH 토지주택연구원(이하 LHRI)에서는 실내 라돈의 위해성을 인지하고 공동주택 실내 라돈 현황 분석 및 주요 라돈 발생원으로부터의 라돈 방출을 규명하기 위해 다양한 연구를 수행해왔다. 특히 선행 연구를 통해서 건축 재료가 함유한 방사성물질과 라돈 방출과의 상관관계 및 단일 건축 재료로부터 발생하는 라돈이 실내 라돈 농도에 기여할 수 있음을 밝혔다⁸⁾⁹⁾. 이를 바탕으로 연구에서는 안전한 공동주택 실내 라돈 환경을 위해 건축 재료의 사후관리를 통한 실내 표면 라돈 방출 저감을 목적으로 콘크리트 등 건축 재료에서 발생하는 라돈 차폐 또는 저감이 가능할 것으로 예상되는 도료를 선정, 건축 재료 표면에서 발생하는 라돈 저감에 도움이 될 수 있는 도료의 특성을 도출하여 도료 특성에 따른 건축 재료 표면 라돈 방출량 감소 효과를 분석하였다. 그 결과, 콘크리트 표면에 일부 도료 적용시 표면에 치밀하고 탄성력이 높은 박막이 형성되어 라돈 방출을 저감시키는 효과가 있는 것으로 분석되었다.¹⁰⁾

다만 도료의 경우, 도포 면적에 따라 TVOC 및 HCHO 등 다른 오염물질 문제가 발생할 수 있기 때문에 실내 사용에 제한적이다. 이를 고려하면 결과적으로 기밀성능 향상 등을 위해 국내외 유통 또는 개발한 건축 재료중 필름 등 박막 형태의 재료를 대상으로 라돈 저감 성능을 평가하고, 재료 자체의 품질분석을 실시하여 현장적용 가능성을 검토하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구는 콘크리트 표면에 필름형 재료 적용을 통해 라돈 방출량을 저감하여 안전한 실내 라돈 환경을 조성하는 것을 목적으로 수행되었다. 이를 위해, 필름형 재료의 콘크리트 시편실험과 실물 벽체를 설치한 Mock-up 및 현장 적용을 통해 사후 라돈 관리의 가능성을 확인하고자 하였다.

8) 전주영 외(2020), 「공동주택 오염물질 방출특성을 활용한 실내공기 평가 연구」 최종보고서, LH토지주택연구원

9) 이병희 외(2022), 「건강주택 구현을 위한 건축 재료 라돈방출량 평가 및 실내 라돈 농도 관리방안 연구」 최종보고서, LH 토지주택연구원

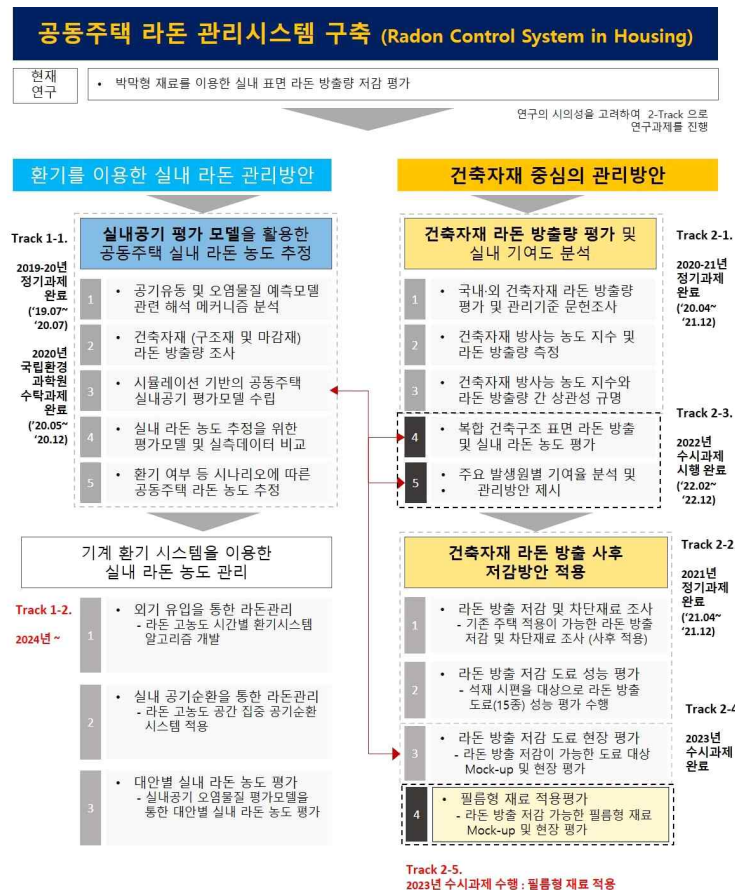
10) 이병희 외(2023), 「방사성물질 저감 도료의 성능평가 연구」 최종보고서, LH 토지주택연구원

2. 연구 범위 및 내용

2.1. 라돈 관리 로드맵¹¹⁾에 따른 연구 범위 설정

LHRI에서는 라돈으로부터 안전한 실내 환경 조성을 위해 2019년부터 구축한 ‘공동주택 라돈 관리시스템’에 따라 연구를 수행하고 있다. 본 연구는 크게 건축자재 라돈 방출 사후 저감 방안 개발에 해당하며, 주요 내용으로는 방사성물질의 실내 유입을 저감하는 필름형 재료의 차단 성능을 평가하고 적용하기 위한 방안을 마련하는 것이다.

공동주택 라돈 관리 시스템에 따른 라돈관리 로드맵의 주요 내용은 [그림 1-1]과 같다.



[그림 1-1] 공동주택 라돈관리 시스템

11) 2019년 제안, 2023년도 수정

2.2. 주요 연구내용

본 연구는 콘크리트 표면에 필름형 재료 적용에 따라 건축 재료에서 방출되는 라돈 저감 효과를 시편 실험, Mock-up 실험 및 현장 적용을 통해 사후 라돈 관리의 가능성을 확인하고자 한다. 본 연구의 주요 연구 내용은 다음과 같다.

■ 국내·외 필름형 재료 유통 및 개발 현황 조사

- 기밀성능 향상, 수분이동 차단 등을 위해 유통 또는 개발중인 필름형 재료 조사
- 가스트루과도 등 라돈 저감성능과 상관성이 있는 필름형 재료의 품질성능 분석

■ 시편을 이용한 필름형 재료의 방사성물질(^{222}Rn) 저감 성능 평가

- 밀폐형 챔버 및 RAD7을 이용하여 콘크리트 시편에 필름형 재료 4종 부착 전/후의 표면 라돈 방출량 측정

■ Mock-up을 이용한 필름형 재료의 방사성물질(^{222}Rn)저감 성능 평가

- 시편실험 결과의 일관성, 현장 적용 가능성 및 문제점 확인 등을 위해 실물 크기의 벽체를 이용하여 라돈 저감 성능에 대한 Mock-up 실험을 수행
- 필름형 재료의 시공 전/후의 표면 라돈 방출량 및 실내 라돈 농도를 비교함으로써 실내 환경과 유사한 조건에서의 라돈 저감 효과 검증

■ 소형공동주택 현장 적용을 통한 필름형 재료의 저감 성능 평가

- 소형 공동주택을 대상으로 실내 라돈 농도 및 표면 라돈 방출 분석에 필요한 인자 (기밀성능, 실내·외 환경조건 등) 조사 수행
- 표면 라돈 방출량 기반 실내 라돈 농도 추정을 위한 해석 모델 수립
- 실내 주요 라돈 발생부위(단열재가 부착되지 않은 콘크리트 벽체)를 대상으로 필름형 재료 시공 및 시공 전/후의 실내 라돈 농도 및 표면 라돈 방출량 비교

■ 필름형 재료를 이용한 실내 라돈 관리방안 제안

- 공동주택 실내 필름형 재료 적용 부위 도출 및 라돈 저감 효과 분석
- 표면 라돈 방출량 저감을 통한 실내 라돈 관리방안 제안

[그림 1-2]는 본 연구의 내용 및 수행방법을 나타낸 것이다.



필름형 재료를 이용한 실내 라돈 관리방안 제언

[그림 1-2] 연구 내용 및 방법

제2장 선행연구 고찰 및 필름형 재료 선정

1. 기존 선행연구 고찰

1.1. LH 공동주택 라돈관리 로드맵에 따른 선행 연구

LHRI에서는 안전한 실내 라돈환경 조성을 위해 2019년도부터 ‘공동주택 라돈 관리시스템’에 따른 로드맵을 설정하고 다양한 연구를 수행해왔다. 이를 통해 실내 라돈 현황을 분석하고 라돈 발생원으로부터의 라돈 방출 원인을 규명하고자 하였으며, 사후 실내 라돈농도 저감을 위한 건축재료적 방안을 제안하였다. 다음은 라돈 관리 로드맵에 따라 수행된 주요 연구의 내용을 정리한 것이다.

■ 「공동주택 오염물질 방출 특성을 활용한 실내공기평가 연구」(전주영 외, 2020)¹²⁾

공동주택 실내 라돈환경 평가 및 관리를 위해 건축자재 라돈 방출 및 실외에서 유입되는 라돈의 매커니즘을 이해하고 실내라돈농도 추정을 위한 수치해석 모델을 제안하고자 하였다. 시뮬레이션에 기반한 실내 라돈농도 추정을 위해 세대 내부 및 공용공간에 라돈가스의 유출입을 모사하였으며, 이를 위해 세대 기밀성능 측정 및 라돈 방출 모사를 위해 세대 내부 마감재 표면에 간이 챔버를 설치하여 라돈 표면 방출량을 측정하였다. 자연 침기 상태에서 대상 세대의 공강별 실내 라돈 농도 기여율을 분석결과, 내력벽 > 비내력벽 및 천장 > 바닥 순으로 나타났으며, 내력벽 비율 50% 저감시 실내 라돈농도는 5%에서 최대 35% 저감까지 가능할 것으로 추정하였다. 또한, 환기 가동시(0.5회/h)에는 소형 및 대형 평형에서 모두 관리기준인 148 Bq/m^3 이하로 유지 가능한 것으로 확인함에 따라 국소 환기를 통한 라돈 관리 방안을 제안하였다.

12) 전주영 외(2020), 「공동주택 오염물질 방출 특성을 활용한 실내공기평가 연구」 최종보고서, LH 토지주택연구원

■ 「방사성물질 방출 저감자재 적용 방안 연구」(전주영 외, 2021)¹³⁾

건축자재의 방사성물질 함유량을 제어하는 자재관리 지침이 수립되어 있으나, 사전 자재관리만으로는 라돈 농도 제어에 한계가 있음을 착안하여 사후 관리를 목적으로 라돈 저감이 가능한 도포제, 차폐재 등을 적용하여 라돈 농도 감소효과를 분석하였다. 200 × 200 × 30mm의 시편에 도료를 도포하여 48시간 이상 경과한 시편의 표면 라돈 방출량 비교 결과, 총 15종의 도료 중 5종에서 약 12~38%의 실내 라돈 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 라돈 저감 효과가 있는 도료는 공통적으로 도막의 탄성력이 우수해 크랙 저항성이 높으며, 부착성이 뛰어나 기체 투과율이 낮아 라돈 투과에 대한 저항성을 높인 것으로 추정된다.

■ 「건강주택 구현을 위한 건축자재 라돈방출량 평가 및 실내 라돈농도 관리방안 연구」(이병희 외, 2022)¹⁴⁾

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 도출하고 건축자재의 라돈 관리 가능성을 확인하고자 하였다. 실제 건설 중인 5개 단지의 현장별 건축자재를 수집하여 시편을 제작하고, 표준 측정법 및 비파괴 측정법을 이용하여 건축자재(콘크리트)의 방사성물질 농도를 측정하였고, 방사능농도지수와 비교 결과 유의미한 상관관계($R^2=0.81\sim0.84$)를 가지는 것을 확인하였다. 다만, 라돈 방출량의 경우 실험실과 현장 측정결과간 상관성을 찾기 어려웠으며 이는 실험실에서의 시편과 현장에서의 콘크리트 표면의 습도 차이에서 기인한 것으로 판단된다. 또한 시뮬레이션 모델(Airflow network model)을 활용하여 건축자재 표면 라돈 방출량 기반 실내 라돈 농도를 추정하였으며 별도의 환기가 일어나지 않는 침기 상태를 가정하는 경우 내력벽 > 비내력벽 및 천장 > 바닥 순으로 실내 라돈 농도 기여율이 높음을 확인하였다. 따라서 건축자재기반의 실내 라돈농도를 관리하기 위한 방안으로 건축자재 자체의 라돈 방출이 많은 골재, 시멘트 등의 사용을 최소화 하기 위해 벽식 구조 보다는 라멘 구조를 활용할 것과, 라돈 방출 가능성이 있는 건축자재 표면부 적용으로 라돈 방출속도를 저감하여, 라돈 방출량 감소 효과를 기대할 수 있는 추가 건축자재(도료 등) 적용을 제안하였다.

13) 전주영 외(2021), 「방사성물질 방출 저감자재 적용 방안 연구」 최종보고서, LH 토지주택연구원

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

■ 「측정 데이터 기반 공동주택 실내 라돈 발생원 분석」(이병희 외, 2022)¹⁵⁾

직접적인 실내 라돈 관리를 위해 실내 표면에서 방출되는 라돈의 양을 고려하여 실내 라돈 농도의 기여도를 분석하고자 하였다. 벽식 구조의 소형 공동주택을 대상으로 RAD7 및 밀폐 순환형 챔버를 이용, 실내 라돈 농도 및 천장, 벽, 바닥 등 공동주택 부위별 표면 라돈 방출량 측정을 통해 실내 라돈 기여도를 추정하였다. 공동주택 부위별 실내 라돈 기여도 분석 결과, 26~44m² 중간 세대 기준으로 단열재가 부착되지 않은 내력벽 > 천장, 단열재가 부착된 내력벽, 바닥면, 욕실벽 등의 순으로 기여율이 높은 것으로 나타났다. 따라서 벽식 구조의 공동주택이 대부분인 국내 소형 공동주택 실내 라돈 관리를 위해서는 주요 실내 라돈 발생 부위인 내력벽의 면적을 줄이거나 차폐 효과가 있는 재료를 추가 시공하는 등 표면 라돈 방출량을 저감할 수 있는 관리방안의 필요성을 제시하였다.

■ 「방사성물질 저감 도료의 성능평가 연구」(이병희 외, 2023)¹⁶⁾

건축자재의 방사성물질 함유량을 제어하는 자재관리 지침이 수립되어있음에도 불구하고, 사전 자재 관리만으로는 라돈농도 제어에 한계가 있으므로 공동주택의 라돈 발생의 주 원인인 콘크리트 벽식구조에서 라돈 저감이 가능한 도포제, 차폐재 등을 적용하여 라돈 농도 감소효과를 분석하였다. 이를 위해 실내에 직접 적용이 가능한 라돈 차단 도료재를 대상으로 동일 조건 하에 밀폐 챔버를 이용하여 라돈 저감 성능평가를 수행하였으며, 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 확인하였다. 도료를 이용하여 실내 라돈 농도 관리를 위해서는 도장의 시공상태에 따라 동일한 도료에서도 라돈 방출 저감량은 다르게 나타나(19~40%) 균질한 시공관리가 중요한 것으로 나타났으며, 실내 공기를 오염시키는 TVOC, HCHO와 같은 라돈 외 오염물질 방출에 대한 검토가 반드시 필요한 것으로 판단된다.

15) 이병희 외(2022), 「측정 데이터 기반 공동주택 실내 라돈 발생원 분석」 최종보고서, LH 토지주택연구원

16) 이병희 외(2023), 「방사성물질 저감 도료의 성능평가 연구」 최종보고서, LH 토지주택연구원

1.2. 필름형 재료 및 특성에 관한 선행 연구

WHO 등 국내·외 환경 및 보건 관련 기구에서는 실내에서의 라돈에 의한 공기 오염을 방지하기 위한 건축적인 방안을 제시하고 있다. 먼저 WHO에 따르면, 실내 라돈 저감을 위해 라돈 예방 및 저감 방안으로 라돈 제어 시스템 설계 기준과 토양 가스 배출(Soil depressurization), 표면 밀봉(Sealing of surfaces), 막 설치(Barriers and membranes), 환기(Ventilation), 지하수 처리(Water treatment) 등이 제시되고 있으며, 미국 재료 시험협회(American Society for Testing and Materials, 이하 ASTM)에서는 신축 저층 주거건물의 라돈 제어 설계 및 시공방법, 그리고 토양가 스배출법의 자재 선택 가이드와 상세한 시공법을 제공하고 있다. 한편 국내에서는 환경부 및 환경관리공단에서 ‘라돈 저감 관리 매뉴얼’을 시공자용과 주택 소유자용으로 구분, 개발 및 보급하여 건축물의 시공 단계와 운영 단계에서 활용 가능한 라돈 저감 방안을 제시하고 있다. 매뉴얼에 따르면, 시공 단계에서는 가스배출법 · 외부공기 유입법 · 차폐법을 적용하며, 건축물의 운영 단계에서는 지속적인 실내 환기의 수행을 권장하고 있다. 그러나 환기는 라돈 방출원의 직접적인 제어 방안이라 할 수 없으며, 실내 라돈 농도를 저감시키기 위한 직접적인 제어 방안으로서 건축재료에 대한 라돈 방출 제안 방안이 요구된다.

선행연구에서는 실내 라돈 농도에 가장 큰 영향을 미치는 건축재료로 우리나라의 공동주택에서 벽체와 슬라브 등의 구조체로 주로 사용되고 있는 콘크리트를 지목하고 있다. 콘크리트의 경우, 토양과 달리 재료 내 라돈가스의 배출이 불가함에 따라 표면 밀봉, 막 설치 등의 저감 방안이 활용될 수 있다. ASTM(2017)은 두께 0.15 mm 이상의 폴리에틸렌 막으로 기초부를 밀봉하는 방법을 제공하였으며, CGSB(2023)는 건축 건물에 대한 라돈 저감 표준 지침에서 고밀도 폴리에틸렌, 폴리프로필렌 등 실내 사용이 승인된 막을 접착제로 슬래브 하부 및 기초 벽에 부착하는 방법을 제공하고 있다. 그러나 대부분 지하층 구조체에 대한 저감 방안으로 한정되어 있으며, 아직까지는 실내 라돈 농도 저감을 위한 지상부 콘크리트 구조체의 저감 방안은 제시되고 있지 않은 실정이다. 따라서, 콘크리트의 라돈 방출 저감에 효과적일 것으로 예상되는 필름형 재료를 지상부에 위치한 콘크리트 구조체에 적용하기 위해서는 필름형 재료의 라돈 저감과 관련한 선행연구 고찰 및 기술 현황 분석이 필요하다.

필름형 재료의 라돈 저감 성능 평가를 위해 기존 연구에서 사용한 지표로는 라돈

저항성(L. Felicioni, 2023), 라돈 확산 계수, 라돈 확산 거리(M. Jiranek, 2019)¹⁷⁾ 등이 있다.

이 중에서는 물질 내의 라돈 확산 속도를 의미하는 라돈 확산 계수를 적용한 사례가 다수 존재하며, 라돈 확산 계수가 작은 재료가 라돈 저감에 효과적임을 의미한다. 본 연구의 선행연구 고찰 범위 내에서는 PU < HDPE < PP < PE, AL < EVOH 순으로 높은 라돈 저감 성능을 나타내고 있었다. [표 2-1]에 기존 문헌에서 측정한 필름형 재료의 라돈 저감 성능 사례를 나타내었다.

[표 2-1] 필름형 재료의 라돈확산 계수

필름형 재료	라돈 확산 계수 (m^2/s)	참고 문헌
HDPE (high density polyethylene)	6.17×10^{-12}	M.Jiranek(2001, 2011, 2019) D.Pressyanov(2011), Papp & C.Cosma (2015) Singh et al.(2005), Georgiev et al.(2019)
LDPE (low density polyethylene)	1.48×10^{-11}	M.Jiranek(2001, 2011, 2019) D.Pressyanov(2011), B.Ruvira(2022) B.Papp & C.Cosma(2015) W.Z.Daoud & K.J.Renken(2001) Singh et al.(2005), Georgiev et al.(2019) Chen et al.(2009), L.Felicioni(2023)
PP (polypropylene)	6.17×10^{-11}	M. Jiranek (2001, 2008, 2011, 2019) B. Ruvira (2022), Singh et al. (2005) Georgiev et al. (2019), L. Felicioni (2023)
PVC (polyvinyl choloide)	6.66×10^{-12}	M. Jiranek (2001, 2011, 2019) B. Ruvira(2022), L. Felicioni (2023) Singh et al. (2005)
BM (bitumen membrane)	1.80×10^{-11}	M. Jiranek (2001, 2011, 2019)

기존 필름형 재료의 라돈 저감 성능 평가 연구(M. Jiranek, 2011)에 따르면, 필름형 재료의 라돈 저감 성능은 재료의 화학적 구성과 두께에 따라 다양하게 나타난다. Chen et al.(2009)은 동일 재료, 두께를 가지는 필름형 재료도 밀도의 차이에 따라

17) ■ 라돈 방출률[E, Exhalation rate](Bq/m²h) : 물질 표면에서 방출되는 라돈 농도(양)을 의미하며, 단위면적, 시간당 방출량을 의미
 ■ 라돈 확산계수[D, Diffusion coefficient](m²/s) : 물질내의 라돈 확산 속도를 의미하며, 작을수록 라돈의 투과농도가 작음. 라돈 확산계수가 작은 재료를 사용해야 라돈 투과율의 저감에 효과적임
 ■ 라돈 확산 거리[L, Diffusion length](m) : 라돈 확산계수(D)와 라돈 자연감쇠율의 비율로 정의
 ■ 라돈 저항성[R, Resistance](s/m, Ms/m) : 재료 두께(d)와 확산계수(D)의 비율로 정의되는 라돈투과저항성을 의미

라돈 저감 성능의 유의미한 차이가 나타남을 제시하였다. 또한 필름형 재료의 라돈 저감 성능은 측정 방법 및 실험 환경에 따라 편차가 나타날 수 있다. B.Papp & C.Cosma(2015)는 동일 재료에 대한 라돈 확산 계수 측정 방법 변경 시, 라돈 자연 감쇠, 누기(leakage)에 의해 라돈 저감 성능의 차이가 나타날 수 있음을 언급하였다. G. Janet(2021)은 챔버 및 실제 건물 크기의 Mock-up에서 필름형 재료의 라돈 저감 성능을 평가하였으며, 재료에 따라 68%~98%의 라돈 저감 성능이 나타남을 확인했다. 이 때 필름형 재료의 라돈 저감 성능은 측정 환경에 따라 최대 18%의 편차가 나타났으며, 이는 벽과의 부착 상태·환경 요소(풍속 등)·벽체 균열 등에 의한 것으로 사료되고 있다. 이러한 기존 연구의 결과는 본 연구의 시편 실험, mock-up 및 주택에서의 현장 실험 결과에 편차가 발생할 수 있으며, 현장 적용 시 재료의 밀도, 두께 등 물리적 특성이 고려되어야 함을 의미한다. 또한, 실험의 재현성 확보 및 편차 최소화를 위하여 실험 과정에서 실험 조건 변화에 따라 챔버의 누기율 측정이 병행되어야 할 것으로 사료된다. [표 2-2]는 필름형재료의 라돈 저감성능 관련 선행연구 내용을 정리한 것이다.

[표 2-2] 필름형재료의 라돈 저감성능 관련 선행연구 내용

저자(연도)	주요 내용
L.Felicioni (2023)	<ul style="list-style-type: none"> - 방수재 10종에 대해 라돈 저항 평균 [Ms/m] 및 환경 영향을 종합적으로 비교, 적절한 방수재 선택 - 동일 두께에 대해서는 HDPE의 라돈 저항 평균이 가장 높았으며, 가장 환경 친화적
B.Ruvira (2022)	<ul style="list-style-type: none"> - ISO 시험법을 기반으로 라돈 저감재료로 사용되는 6종의 확산계수 측정 - 폴리머 계열 5종과 복합재료 1종의 확산계수 측정해 문헌조사한 타 재료들과 비교 - 6종 중 PP와 PVC가 저감재로 효과적
G.Janet (2021)	<ul style="list-style-type: none"> - ISO 시험법 기반의 (1)Chamber test & (2)house mock test로 확산계수, 저항성, 저감효율 산출 - 14종 Chamber test 하에 선정된 5종 대상으로 house test 실험 - 라돈 저감효율은 확산계수와 명백한 관계 찾기 어렵고, 확산계수 및 두께 동시 고려된 라돈 저항성과 관계성 있음 - 현장설치 후(House test)의 라돈 저감효율은 chamber 시험에서의 저감효율보다 낮음
M.Jiranek (2019)	<ul style="list-style-type: none"> - 라돈에 대한 충분한 보호를 제공하는 특정 방수 물질의 능력은 두께와 라돈 확산계수에 의해 결정됨 - 라돈 저항 조건 50-600 Ms/m과 d/l 비율 등을 모두 종합하였을 때, (1) PU; (2) HDPE; (3) PP; (4) PE-AL; (5) EVOH 의 5가지 재료가 가장 활용 가능성 높음
M.Jiranek (2011)	<ul style="list-style-type: none"> - 36개 방수재료의 확산계수 측정
J.Chen (2009)	<ul style="list-style-type: none"> - 투습방지막 10종을 대상으로 라돈 확산계수 측정 - Membrane/ Membrane + Tape 확산 계수 측정, Tape 부착 시 일반적으로 확산 계수 낮아짐 - 밀도와 확산 계수의 관계에 집중하여, 고밀도의 재료가 라돈 저감에 효과적임을 보임
W.Z.Daoud (2001)	<ul style="list-style-type: none"> - 콘크리트의 라돈 확산에 대한 필름 재료의 저감 능력을 확인하였음 - 시판 필름 9개(폴리머 계열 4종)에 대해 실험 - 필름을 사용할 경우 콘크리트의 라돈 확산 계수를 98%까지 저감시킬수 있었음

2. 필름형 재료 조사 및 선정

2.1. 필름형 재료 선정 기준 수립

본 연구에서 성능평가를 대상으로 하고자하는 필름형 재료 선정을 위해 4가지 기준을 선정하였다. 공동주택 실내에 라돈 저감을 위해 적용되는 필름형 재료는 실내 공기 오염물질(TVOC, HCHO 등) 방출 위험이 없고, 콘크리트 벽면 내 시공을 고려하여야 한다. [표 2-3]에 필름형 재료 선정 기준을 나타내었다.

[표 2-3] 필름형 재료 선정 기준

구 분	내 용
시공성	<ul style="list-style-type: none"> - 재료의 시공 용이성을 의미하며, 시공 과정의 복잡성과 활용 도구, 기술, 작업 시간 등을 포함 - 필름형 재료의 재료 물성에 따른 벽면 부착 시의 난이도를 검토하여 시공 가능한 재료를 선정
경제성	<ul style="list-style-type: none"> - 재료의 비용 및 비용 효율성을 의미하며, 재료의 초기 비용 및 설치, 운영 및 유지 보수 비용을 포함 - 적정 가격의 내구성이 뛰어난 제품을 선정하여 비용을 절감할 수 있도록 함
활용도	<ul style="list-style-type: none"> - 재료의 활용 가능성을 의미. 라돈을 저감시킬 수 있는 재료를 선정해야 하며, 다양한 용도 및 환경에서의 적용 가능성을 검토하여 벽체·천장·바닥 및 실내·외 등으로의 적용 확장성을 평가 - 라돈 저감 가능성은 라돈 확산 계수 또한 산소 투과도 측정을 통한 재료의 구성성분을 분석하여 평가
적용성	<ul style="list-style-type: none"> - 재료의 현장 적용성을 의미하며, 실제 시공 현장에서 쉽게 적용될 수 있는지를 의미. - 국내·외 유통 및 개발된 제품을 대상으로, 재료 조달 용이성 및 다른 건축재료(마감재 등)와의 호환성을 검토하여 콘크리트와 벽지에 부착 가능한 필름형 재료를 선정

2.2. 후보군 선정 및 유형 분류

위 기준에 따라 국내·외 시중에 유통 중인 시판 제품을 조사하여 시공이 가능한 제품으로 후보군을 선정하였다. 사용 목적에 따라 기밀, 방수, 라돈 저감, 단열의 4가지 유형으로 분류하였으며, 선정된 후보군은 [표 2-4]와 같다.

[표 2-4] 필름형 재료 조사 내용

구분	항목	제품명	재료	국가	기타	판매 단위 (m ²)	두께 (mm)	단위면적당 가격 (원/m ²)
기 밀	기밀 테이프/멤브레인	ME010 TDS	소수성 PE	영국	-	1.5 x 50	0.5	11,686
	프로클리마 내부 기밀용 투습방습지	Intello	폴리프로필렌폴리스; 폴리에틸렌 - 코폴리머 멤브레인	독일	-	1.5 x 50	0.25	5,867
	기밀방습지	Tyvek	-	정보 없음	듀폰사	1.5 x 50	0.3	2,687
	가변형 투습방습 필름	VARIO XtraSafe	폴리아미드	프랑스	saint-gobain isoba사	1.5 x 40	0.2	4,353
	외부용 투습방수시트	VARIO KM Duplex UV	-	프랑스	saint-gobain inoba사	1.5 x 40		4,571
단 열	스카이텍 열반사 단열재	스카이텍 단열재	알루미늄, 유리섬유	정보없 음	원코	1.0 x 18	8	10,434
	스카이텍 열반사 단열재	스카이텍 리플렉섬	고순도 알루미늄	정보없 음	원코	1.0 x 25	5	9,778
	열반사 단열재 (점착/비점착)	이큐브 6T	알루미늄, 부직포 펠트, PE 폼, 알루미늄 필름	대한민 국	프라임에너지텍(주)	1.0 x 50	6	3,200
	열반사 단열재 (점착/비점착)	이큐브 10T	알루미늄, 부직포 펠트, PE 폼, 알루미늄 필름	대한민 국	프라임에너지텍(주)	1.0 x 25	10	6,200
	복사차단재	RBI7	알루미늄 필름	대한민 국	프라임에너지텍(주)	1.0 x 50	0.2	3,300
방 수	델타 투습방수지	Delta vent N	폴리프로필렌 3겹	독일	-	1.5 x 50	-	1,613
	MDM 투습방수지	MDM VAXO S	폴리프로필렌 3겹	폴란드	-	1.5 x 50	-	880
	델타 멤브레인 시트	DELTA MS	PE 수지 딤플시트	독일	투습&기밀 방습지	2.0 x 20	8	3,850
	진흥 투습방수지	JH-VENT W	PP 수지 2겹	대한민 국	-	1.5 x 50	-	880
	하이드로갭 투습방수지	Hydrogap Drainable Housewrap	부직포+폴리프로필렌+부직포	미국	-	1.5 x 30.5	1.4	4,372
	프로클리마 투습방수지	Solitex Power	폴리프로필렌 - 마이크로화이버	독일	-	1.5 x 30	0.4	3,556
	프로클리마 DA 방습지	DA 방습지	폴리프로필렌	독일	-	1.5 x 50	0.45	3,867
	유로벤트 투습 방수지	월프로텍트3	-		-	2.8 x 50	-	1,571

[표 2-4] 필름형 재료 조사 내용(계속)





구분	항목	제품명	재료	국가	기타	판매 단위 (m ²)	두께 (mm)	단위면적당 가격 (원/m ²)
라돈 저감	Radon Foil	AlphaBlock4+	-	독일		1.2 x 50	0.8	10,880
	Radon Foil	AlphaBlock3	PE+알루미늄 호일+PE	독일		1.0 x 50	0.17	9,864
	-	Radon Block	폴리에틸렌, EVOH 수지 등의 7겹	캐나다	라돈 투과 시험 有	-	-	-
	MAPEPROOF	MAPEPROOF FBH	HDPE, PP	이탈리 아	방수 & 라돈 저감	1.0 x 20	1.25	-
	MAPEPROOF	MAPEPROOF AL AP	HDPE	이탈리 아	방수 & 라돈 저감	1.0 x 20	1.2	-
	MAPEPROOF	MAPEPROOF SA	HDPE	이탈리 아	방수 & 라돈 저감	1.0 x 20	0.5	-
	MAPEPROOF	MAPEPROOF FBT	FPO, PP	이탈리 아	방수 & 라돈 저감	1.0 x 20	1.7	-
	Radon Barrier	RADON BARRIER POLYESTER	폴리에스터 등의 5겹	이탈리 아	라돈 투과 시험 有	1.0 x 10	4	-
	Radon Barrier	RADON BARRIER/V	유리섬유, 알루미늄호일 등의 6겹	이탈리 아	라돈 투과 시험 有	1.0 x 10	4	-
	Radon Barrier	RADON BARRIER ARMODILLO POLYESTER	폴리에스터 등의 6겹	이탈리 아	라돈 투과 시험 有	1.0 x 7.5	-	-

2.3. 평가대상 필름형 재료 선정

필름형 재료 후보군과 선정 기준을 기반으로 [표 2-5]와 같이 4가지의 필름형 재료를 선정하였다. 특히, 콘크리트 벽체에 설치되어야 하는 특성을 고려하여 각 유형별 얇은 두께를 가진 재료를 선정하였고, 선행연구 고찰 결과 라돈 저감 성능이 뛰어난 재료인 PE(폴리에틸렌)로 구성된 자재의 선정이 고려되었다.

- 기밀 필름은 공기의 흐름을 차단하여 기밀을 유지하는 용도로 사용되며, PP(폴리프로필렌)로 만든 플리스 섬유와 PE(폴리에틸렌) 중합체의 두 층이 접합된 두께 0.19 mm의 필름이다.
- 방수 필름은 외부 방수 및 내부 투습 성능을 목적으로 사용되며, PP 수지 2겹으로 구성된 두께 0.28 mm의 필름이다.
- PE 필름은 일반 비닐의 용도로 사용되는 0.07 mm 두께의 HDPE(고밀도 폴리에틸렌) 필름이다.
- 단열 필름은 0.4 mm 두께의 열반사 단열재로 복사열 차단하는 목적으로 사용되며, AL(알루미늄) 두 겹 사이에 부직포가 있는 3겹으로 구성되어 있다.

[표 2-5] 평가대상 필름형 재료 선정 결과

유형	기밀 필름	방수 필름	PE필름	단열 필름
사진				
구분	기밀-2	방수-3	라돈-7	단열-4
용도	내부 기밀용 투습방습지	투습방수지	비닐	열반사 단열재
두께	0.19 mm	0.28 mm	0.07 mm	0.4 mm
재료	PP 플리스 - PE 코폴리머	PP 수지 2겹	HDPE	AL, 부직포 등 3겹
단가 (원)	3,300/㎡	880/㎡	5,867/㎡	580/㎡

3. 필름형 재료 품질특성 분석

필름형 재료의 품질특성은 방사성물질(라돈)과 동일·유사하거나 입자가 작은 가스를 이용한 투과도를 라돈 방출과 상관성 있는 품질항목을 확인하고자 하였다. 이를 위해 선정된 필름형 재료 4종의 품질특성을 산소투과도 시험을 통해 분석하였다. 산소 투과도는 ASTM F-1927 규격에 따라 20℃, 65%의 실험 조건에서 수행하였으며, 이 때, 측정 범위는 $0.5 \sim 10000 \text{ cm}^3 / \text{m}^2 \cdot 24\text{hr} \cdot \text{atm}$ 이다. 필름형 재료 4종의 산소 투과도 시험 성적서는 [그림 2-1]에 나타내었으며, 시험 결과는 [표 2-6]과 같다. PE 필름의 산소투과도는 $2015 \text{ cm}^3 / \text{m}^2 \cdot 24\text{hr} \cdot \text{atm}$ 으로 선행 연구(권영제 외, 2014)와 유사한 수준임을 나타내었으며, 그 외 필름형 재료의 산소투과도는 측정 범위를 초과하는 값을 나타내었다. 산소투과도 결과에 따른 필름형 재료의 성능은 단열 필름, PE 필름, 기밀 필름, 방수 필름 순으로 나타내었다. 이는 시료의 두께 · 화학성분 및 밀도 차이 때문인 것으로 사료된다.



[그림 2-1] 필름형 재료별 산소투과도 시험 성적서

[표 2-6] 필름형 재료의 산소투과도 측정 결과

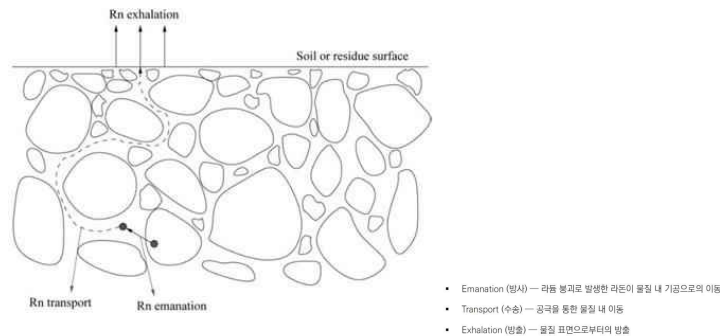
구 분	단열필름	PE필름	방수필름	기밀필름
두께 [mm]	0.4	0.07	0.28	0.19
산소투과도 [cm ³ /(m ² ·24h·atm)]	< 0.5	2,015	> 10,000	> 10,000

제3장 필름형 재료의 방사성물질 측정방법 및 적용방안

1. 필름형 재료의 방사성물질 측정방법 선정

1.1. 필름형 재료의 방사성물질 표면 방출량 시험방법

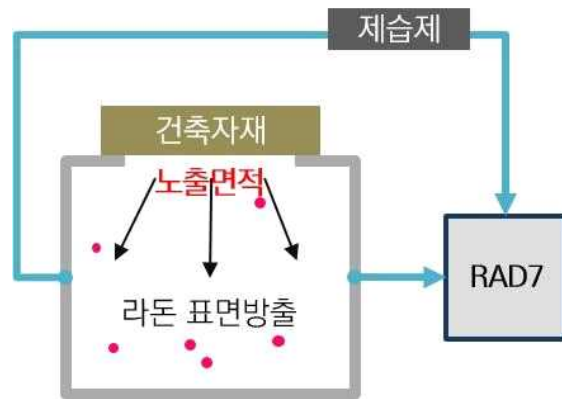
라돈은 확산 과정을 통해 물질 내부 공극을 통해 표면으로 이동하여, 방출 과정을 통해 물질의 표면에서 대기 중으로 나오게 되어 공기 중에 가스 상태로 존재한다. ([그림 3-1] 참조) 이때, 라돈 표면 방출량(E , Bq/m^2h)은 물질 표면에서 방출되는 라돈 농도로 단위 면적·단위 시간당 방출량을 의미한다.



[그림 3-1] 라돈 발생원에서의 방사·수송·방출

현재 콘크리트 등 건축 재료 표면에서 발생하는 방사성물질의 방출량을 측정하는 표준 시험방법은 아직 정립되어있지 않은 상황이다. 본 연구에서는 건축 재료 표면에서 방출하는 라돈의 방출량을 추정하기 위해 이병희 외(2023)의 선행연구¹⁸⁾에서 정립한 바와 같이, 소형 챔버를 이용하여 건축 재료에서 발생하는 오염물질을 측정하는 방법에서 착안한 방법인 밀폐형 구조의 챔버를 이용하여 챔버 내 포화된 라돈 농도 값으로부터 건축재료의 표면 라돈 방출량을 추정하는 방법을 이용하였다. [그림 3-2]는 밀폐형 챔버를 이용한 건축재료의 표면 라돈방출량 평가방법을 나타낸 것이다.

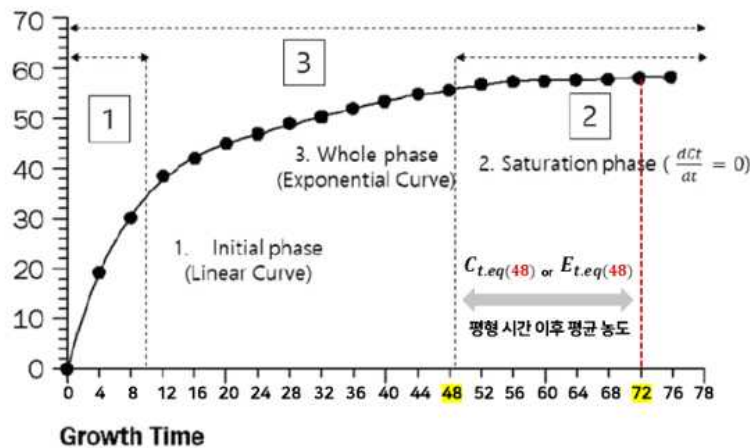
18) 이병희 외(2023), 「측정데이터 기반 공동주택 실내 라돈 발생원 분석」 최종보고서, LH 토지주택연구원
이병희 외(2023), 「방사성물질 저감 도료의 성능평가 연구」 최종보고서, LH 토지주택연구원



[그림 3-2] 건축 재료 표면 라돈 방출량 평가방법 개요

밀폐형 챔버를 이용한 측정방법은 실험 오차와 추정값의 오차를 최소화 하는데 유리하다. [그림 3-2]에 나타난 것처럼, 측정시 건축 자재의 라돈 방출 표면의 노출 면적이 작기 때문에 외부 공기 유입이 차단되어 챔버 내 환경 변화가 적은 밀폐형 챔버가 챔버 내 라돈 농도 포화 조성에 유리하기 때문이다.

[그림 3-3]은 라돈 농도의 누적 그래프를 나타낸다. 라돈 농도는 초기 배경농도에서 시작하여 자재의 라돈 방출에 따라 초기에는 선형적으로 증가(①, Linear Curve)하게 된다. 이후 일정 시간이 지나게 되면 시간 흐름에 따라 농도 변화가 줄어들어 정상 상태(②, Saturation Phase)에 도달하게 되며, 전반적인 라돈 농도의 누적 그래프는 지수함수의 역함수 형태(③, Exponential Curve)를 나타낸다.



[그림 3-3] 라돈 농도 누적 그래프

밀폐형 챔버의 라돈의 포화농도를 이용하여 건축 재료 표면 라돈 방출량을 추정하기 위한 라돈 농도 보존 방정식은 Eq.(1)와 같다.

Indoor Radon Balance Equation

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

Initial Phase (Linear Curve)

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

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

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

여기에서,

C_t : Indoor radon concentration (Bq/m³)

$C_{initial}$: Initial radon concentration (Bq/m³)

E : Exhalation rate (Bq/m²·h)

V : Volume (m³)

A : Surface area (m²)

λ_{eff} : Effective decay rate (1/h)

λ_{Rn} : Radon decay constant, 2.1×10^{-6} (s⁻¹)

λ_h : Back-diffusion rate (s⁻¹)

λ_l : The leakage rate for radon in the chamber (s⁻¹)

동일한 라돈 방출농도 측정 값을 사용하더라도, 라돈 농도 보존 방정식을 어떻게 이용하여 평가하느냐에 따라 라돈 방출량 추정값이 달라질 수 있다. 따라서 측정된 라돈 농도를 바탕으로 방출량을 평가하기 위해서는 측정 결과의 상태를 가정할 필요가 있다. 측정 기간이 짧아 라돈 농도가 선형으로 증가하는 경우, Eq.(2)와 같이 선형 기울기를 통해 밀폐 챔버 내 라돈 농도를 평가할 수 있다. 측정 시간이 길어져 라돈 농도가 곡선을 그리며 농도가 상승하는 경우, 지수 함수 형태의 해석인 Eq.(4)를 바탕으로 방출량을 평가한다. 다만 두 방식 모두 추가적으로 측정된 결과를 수식에 선형 또는 커브 피팅하는 절차가 필요하다. 일정 기간 측정을 통해 실내 라돈 농도가 시간 흐름에 따른 영향이 적을 경우에는 정상상태 가정을 통해 Eq.(3)과 같이 밀폐 챔버 내 라돈 농도를 산출할 수 있다. 이병희 외(2023)¹⁹⁾의 연구에서는 내력벽을 대상으로 측정한 밀폐 챔버의 농도를 이용하여 표면 라돈 방출량을 추정한 결과를 비교한 결과 시간이 길어질수록 지수 함수 형태의 추정 또는 정상상태의 추정방법이 더 정확함을 시사한 바 있다.

따라서 본 연구에서는 측정된 결과를 바탕으로 빠른 방출량 비교 분석을 위해 챔버 내 농도를 최소 72시간 이상 동안 측정하였고, 정상상태 가정, 즉 평형상태에서의 산출식(Saturation Phase)인 Eq.(3)을 활용하여 밀폐 챔버 내 라돈 농도를 평가하고자 하였다. 이때, 측정실험 당 평형 시간을 고려하여 평형 시간(h) 이후 마지막 24시간의 평균 방출량을 평형 시간 기준 표면 라돈 방출량 $E_{t.eq(h)}$ 및 밀폐 챔버 내 라돈 농도 $C_{t.eq(h)}$ 로 정의하였다. 예를 들어, $E_{t.eq(48)}$ 은 평형 시간 48시간 이후 마지막 1일(49~72h)의 평균 표면 라돈 방출량, $C_{t.eq(72)}$ 는 평형 시간 72시간 이후 마지막 1일(72~96h)의 밀폐 챔버 내 평균 라돈 농도를 의미한다.

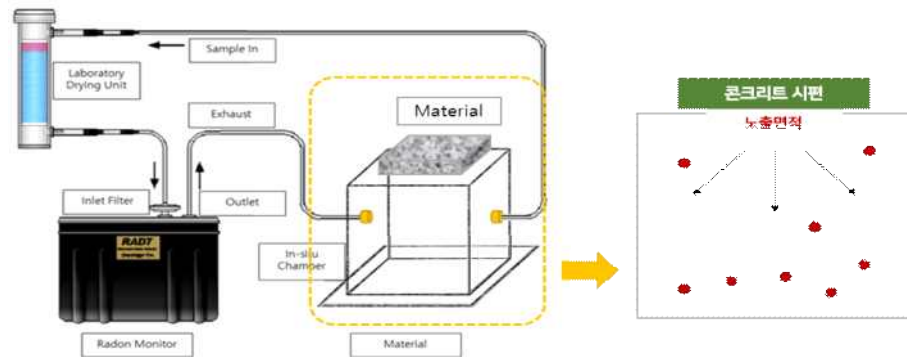
Eq.(3)에서 유효감쇠율 λ_{eff} 는 Eq.(5)와 같이 라돈 자체의 감쇠항 λ_{Rn} ²⁰⁾과 콘크리트 시편의 back diffusion λ_h , 챔버의 누기율 λ_l 을 고려하여 산출된다. 본 연구에서 활용한 콘크리트 시편은 back diffusion의 영향을 최소화하는 최대 두께(0.05 m)로 제작되어, $\lambda_h = 0$ 으로 설정하였다. 챔버의 누기율 λ_l 은 부착 면 또는 방식에 의해 변동하므로 시편, Mock-up, 공동주택 현장에서의 라돈 방출농도 측정 단계마다

19) 이병희 외(2023), 「방사성물질 저감 도료의 성능평가 연구」 최종보고서, LH토지주택연구원

20) 라돈 자체의 decay constant : $2.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

챔버의 누기율을 측정하여 활용하였다.

종합하면, 본 연구에서는 시편 및 벽체의 건축 자재 표면에서의 라돈 방출량 측정을 위해 [그림 3-4]과 같이 아크릴로 구성된 0.3 m × 0.3 m × 0.3 m 크기의 밀폐 챔버를 활용하였으며, 정상상태 가정을 위해 최소 72시간 이후 밀폐 챔버 내 라돈 농도를 기반으로 표면 라돈 방출량을 추정하였다.



[그림 3-4] 밀폐 챔버를 이용한 시편 밀폐 챔버 내 라돈 농도 측정 방법

1.2. 필름형 재료 적용 전·후의 실내 공기 중 방사성물질 농도 측정방법

실내공기중 라돈은 2024년 10월 현재 2024.2.27, 발령·시행 된 「실내공기질공정 시험기준」(국립환경과학원 고시 제2024-20호)에 의거하여 알파비적검출법(주 시험방법)과 연속측정방법(부 시험방법)으로 측정할 수 있다. 신축공동주택의 경우 「실내공기질 관리법 시행규칙」 제7조에 의해 신축공동주택의 실내공기질 권고기준치인 148Bq/m³ 이하가 되도록 하여야 하며, 이때 라돈 농도를 2일이상 90일 미만으로 단기 측정하기 위한 방법인 연속측정방법을 이용하여 측정한다. 「실내공기 질공정시험기준」에 의한 신축공동주택에서 실내공기중 라돈 농도를 측정조건은 [표 3-1]²¹⁾과 같다.

[표 3-1] 신축공동주택의 실내공기중 라돈 농도 측정 조건 및 개요

구 분		내 용	
(1) 환기		신축 공동주택의 단위세대의 외부에 면한 모든 개구부(창호, 출입문, 환기구 등)와 실내 출입문, 수납가구의 문 등을 개방하고, 이 상태를 30분 이상 지속한다.	
(2) 밀폐		외부 공기와 면하는 개구부(창호, 출입문, 환기구 등)를 5시간 이상 모두 닫아 실내외 공기의 이동을 방지한다. 이때, 실내간의 이동을 위한 문과 수납가구의 문은 개방한다.	
(3) 라돈측정		밀폐 후 실내 농도측정은 실내에 자연환기 및 기계환기설비가 설치되어 있을 경우,이를 밀폐하거나 가동을 중단하고 48시간 측정한다. 측정 시 실내온도는 20℃ 이상을 유지하도록 한다.	
(4) 환기설비 가동 및 24시간 측정		실내에 자연환기 및 기계 환기설비가 설치되어 있을 경우, 이를 가동*하면서 24시간 측정한다. 측정 시 실내온도는 20℃ 이상을 유지하도록 한다. ※ 환기설비 가동조건은 “건축물의 설비기준 등에 관한 규칙(국토부령)”에 따르며 자연환기설비는 최대 개방하고 기계환기설비의 경우 “적정”단계로 가동하여 측정한다.	

←

평균값 < 148 Bq/m³

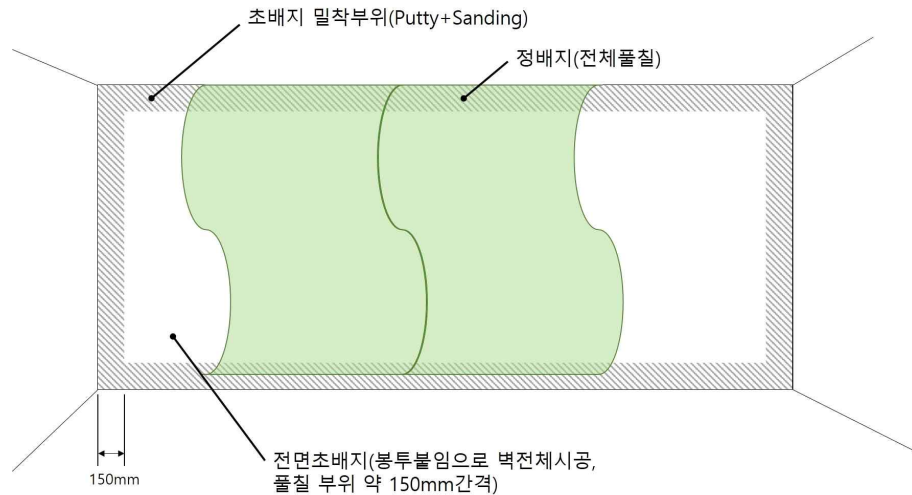
→

30m	5h	48h	24h
(1) 환기	(2) 밀폐	(3) 라돈 측정(밀폐)	(4) 환기설비 가동 및 24시간 측정
측정준비		측정	

본 연구의 목적은 공동주택에 실내 라돈 농도 저감을 위해 필름형 재료를 적용하고, 적용 전·후 Mock-up 실험과 공동주택 현장에서의 실험 및 측정을 통해 실내 라돈 농도를 비교 평가하며, 최종적으로 신축공동주택의 실내공기질 권고기준 이하로 라돈 농도를 관리하기 위함이다. 따라서 본 연구에서의 실내공기 라돈 농도 측정 및 비교는 실내공기질 공정시험방법에 의한 신축공동주택 라돈 농도 측정 방법을 이용하였다.

21) 「실내공기질공정시험기준」 ES 02130.g 실내공기오염물질 시료채취 및 평가방법, 국립환경과학원고시 2024-20호 (2024.02.27.)

필름형 재료 적용 부위인 소형공동주택의 내력벽은 도배지로 마감한다. 이때 필름형 재료는 라돈 방출원인 콘크리트 벽체와 마감재인 도배지 사이에 적용되어, 콘크리트로부터 방출되는 라돈의 실내 유입 속도를 늦추어 실내 라돈 농도를 저감하는 역할을 한다. 콘크리트 벽체에 도배시공은 바탕처리 → 초배지 시공 → 정배지 시공 → 마무리 및 건조의 순서로 이루어진다. 이때 일반적으로는 마감면의 평활도 유지를 위해 벽지의 모든 면이 벽에 밀착되지 않고 벽에서 떠있게 접착하는 봉투 붙임(갓둘레 풀칠) 시공을 한다. 이는 [그림 3-6]과 같이 초배지 4면의 가장자리만 풀칠을 하여 벽에 접착하고, 정배지를 초배지와 밀착시켜 초배지와 정배지가 함께 벽면으로부터 떠있게 하는 것이다.



[그림 3-6] 벽체 도배시공(봉투붙임) 개념

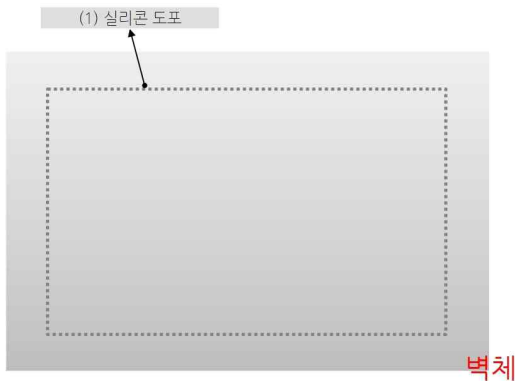
따라서, 콘크리트 벽체에 필름형 재료를 시공하기 위해서는 먼저 초배지가 부착되는 가장자리 풀칠 부분을 제외한 면에 봉투붙임과 같은 방법으로 벽체에 부착하고, 그 이후에는 초배지 및 정배지를 일반적인 도배시공 방법에 따라 부착하는 방법으로 적용하는 것이 가장 바람직하다고 판단된다. 본 연구과제에서 실시한 필름형 재료 및 도배 시공 순서를 요약하면 [그림 3-7] ~ [그림 3-9]와 같다.

- (1) 먼저, 초배지 부착면을 고려하여 15~20cm의 풀칠면을 두고 실리콘을 필름형 재료 크기에 맞추어 끊김 없이 도포한다. ([그림 3-7])
- (2) 실리콘 도포위치에 필름형 재료의 4면을 맞추어 뜯부분이 생기지 않도록 필름

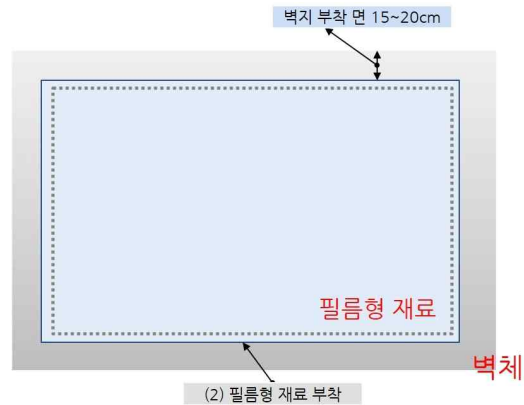
형 재료를 부착한다. ([그림 3-8])

(3) 필름형 재료의 모든 4면의 테두리에 우레탄테이프 등을 부착하여 마무리한다.
([그림 3-9])

(4) 필름형 재료 시공면 위에 초배지 및 정배지를 시공한다.



[그림 3- 7] 필름형 재료 시공 1단계(실리콘 도포)



[그림 3-8] 필름형 재료 시공 2단계(필름형 재료 부착)



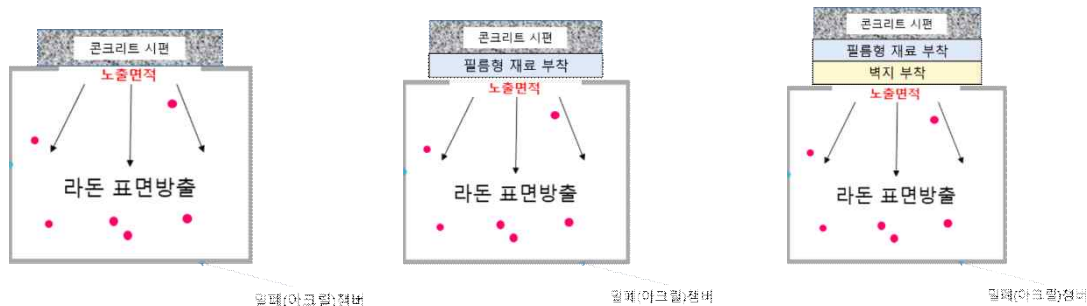
[그림 3-9] 필름형 재료 시공 3단계(테이프 4면 부착)

제4장 필름형 재료의 방사성물질 방출량 측정실험

1. 시편을 이용한 필름형 재료의 방사성물질 방출량 측정실험

1.1. 실험 개요 및 프로세스

본 절에서는 아크릴로 제작된 밀폐 챔버를 활용하여 앞선 2장에서 선정된 필름형 재료 4종의 밀폐 챔버 내 표면 라돈 농도 측정 및 차단 성능 평가 수행을 통해 가스 투과도 및 차단능력이 우수한 필름형 재료 1종을 최종 선정하고자 하였다. 이를 위해 콘크리트 시편에 필름형 재료 4종의 부착 전과 후의 밀폐챔버 라돈 농도 측정 및 표면 라돈 방출량을 도출하였다. 콘크리트 시편은 동일한 현장의 콘크리트를 이용하여 제작하더라도 콘크리트 내 공극 및 표면 상태, 건조상태에 따라 표면 라돈 방출량의 차이가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 재료 1종마다 시편 3개를 대상으로 콘크리트 자체의 표면 라돈 방출량을 측정하여 이후 최소 2개 시편에 대해 필름형 재료를 적용 후 라돈 방출농도 측정을 수행하였다. 전체 실험은 2개의 콘크리트 시편을 활용하여 (1) 콘크리트 시편 자체, (2) 필름형 재료 시공 후, (3) 필름형 재료 및 벽지 시공 후의 3단계로 각 콘크리트 시편에 대해 단계별 2회 반복 실험을 통해 총 48회의 측정을 수행하였다.

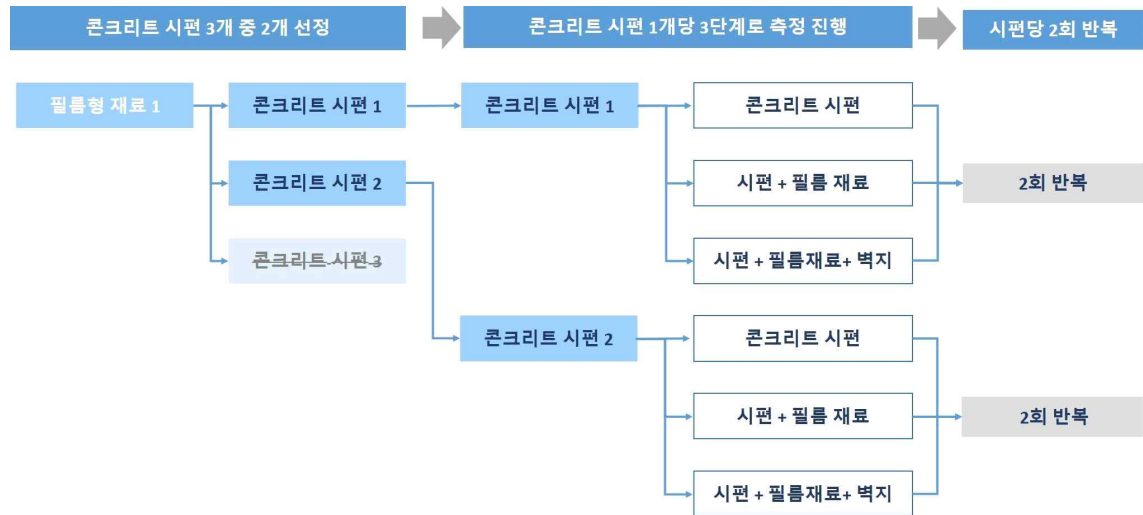


[그림 4-1] 콘크리트 시편 적용(1단계)

[그림 4-2] 필름형재료부착(2단계)

[그림 4-3] 벽지 부착(3단계)

[그림 4-4]는 콘크리트 시편을 이용한 필름형 재료의 라돈 방출 측정 실험 프로세스를 나타낸 것이다.



[그림 4-4] 콘크리트 시편을 이용한 실험 프로세스

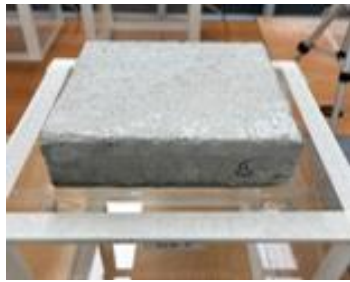


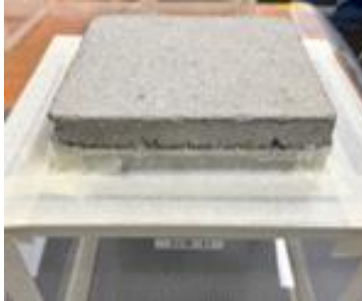
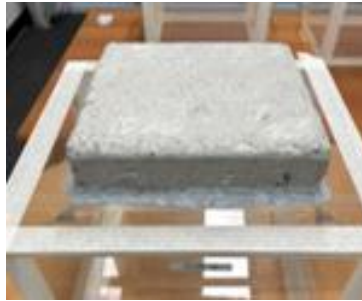
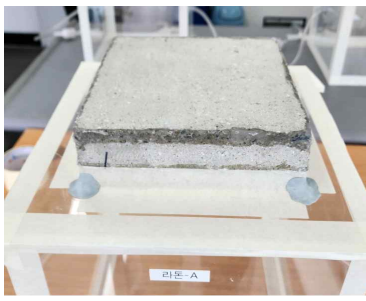
1.2. 시편을 이용한 필름형 재료의 방사성물질 측정실험 방법

■ 시편 제작 및 부착방법

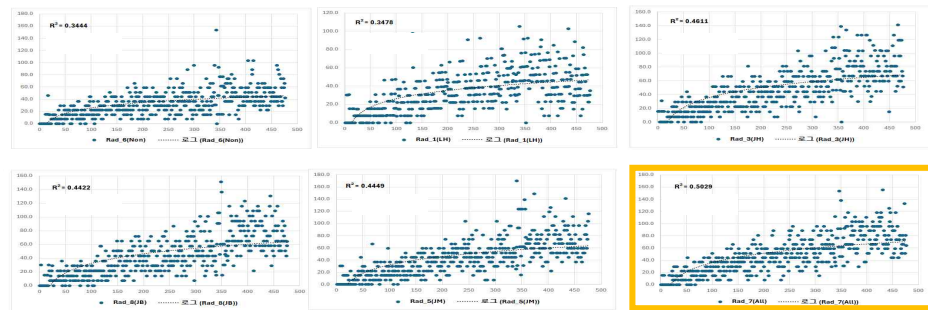
본 연구에서 활용한 콘크리트 시편은 충청남도 지역 내 공동주택 시공 현장에서 타설한 일반 아파트용 압축강도 240 kgf/cm² 의 콘크리트를 이용하여 제작하였으며, 시편의 크기는 0.2m × 0.2m × 0.05 m 이다.

앞서 언급한 바와 같이 밀폐 챔버는 챔버 내 환경 변화를 적게 유지하기 위해 외부 공기가 유입되지 않도록 기밀하게 콘크리트 시편을 노출 면적 위에 부착해야하므로 [표 4-1]과 같이 6가지 부착 case를 대상으로 사전 측정실험을 수행하였다.

[표 4-1] 콘크리트 시편 부착 Case

Case 1	Case 2	Case 3
		
단순 얹음	시편 모서리 실리콘 도포	시편 모서리 실리콘 도포 + 마스크 테이프 밀봉
Case 4	Case 5	Case 6
		
마스크 테이프 밀봉 + 테이프 부착부 실리콘	BluTack 활용	Case 4 + BluTack 활용 모서리 밀봉

[표 4-1]에서 Case 1은 단순히 챔버 위에 콘크리트 시편을 얹는 방식, Case 2는 시편 모서리에 실리콘을 도포하여 부착하는 방식, Case 3은 시편 모서리 실리콘 도포 후 마스킹 테이프로 밀봉하여 부착하는 방식, Case 4는 마스킹 테이프를 활용하여 부착 후, 콘크리트와 마스킹 테이프 부착면에 실리콘을 도포하는 방식, Case 5는 찰흙형 재사용 본드 BluTack을 사용하여 부착하는 방식, Case 6은 Case 4에서 상대적으로 외부 공기의 유입이 예상되는 모서리부에 BluTack을 활용한 방식을 의미한다.



[그림 4-5] 6가지 부착 case에 대한 초기 라돈 농도 분포

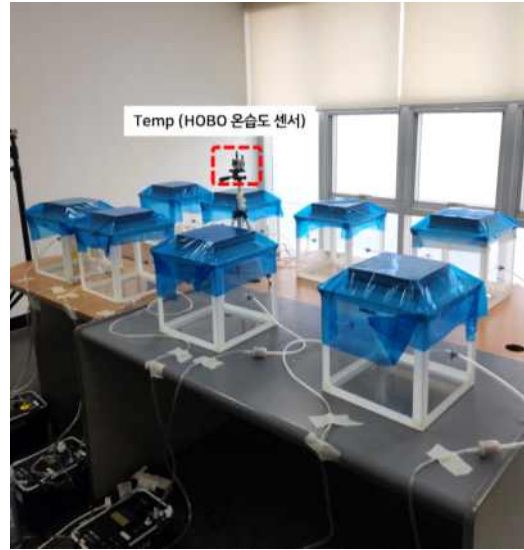
[그림 4-5]는 6가지 부착 Case 각각에 대한 초기 라돈 농도 분포를 나타낸다. 부착 방식은 측정 데이터의 안정성을 고려하여, 로그함수 추세선의 결정계수(R2)를 가장 높게 나타내는 방식으로 선정하였다. 결정계수는 각각 Case 1에서 0.3444, Case 2에서 0.3478, Case 3에서 0.4611, Case 4에서 0.4422, Case 5에서 0.449, Case 6에서 0.5029를 나타내었다. 따라서, 본 연구에서는 마스킹 테이프를 활용하여 부착 후, 콘크리트와 마스킹 테이프 부착면에 실리콘을 도포하고 모서리부를 BluTack으로 마감한 Case 6 방식을 활용하여 콘크리트 시편을 밀폐 챔버에 부착하였다.

■ 실험 환경 구축

[그림 4-6]은 실험실 내에 밀폐 챔버를 이용한 필름형 재료의 표면 라돈 방출량 측정을 위한 실험 환경을 구축한 것을 나타낸다. 실험 환경은 실험실 내 천장 부착형 시스템 에어컨을 20 °C의 설정온도로 셋팅하였으며, 실내 온습도 측정을 위해 HOBO 온습도 센서를 설치하였다. 또한, 실내 환경 변화 확인을 위해 실험 과정에서 실내 공기 중 라돈 농도를 함께 측정하였다. 콘크리트 시편은 선정된 부착 방식으로 부착 이후 데이터 안정성 확보를 위해 기밀 테이프를 활용하여 후면을 밀폐하였다.



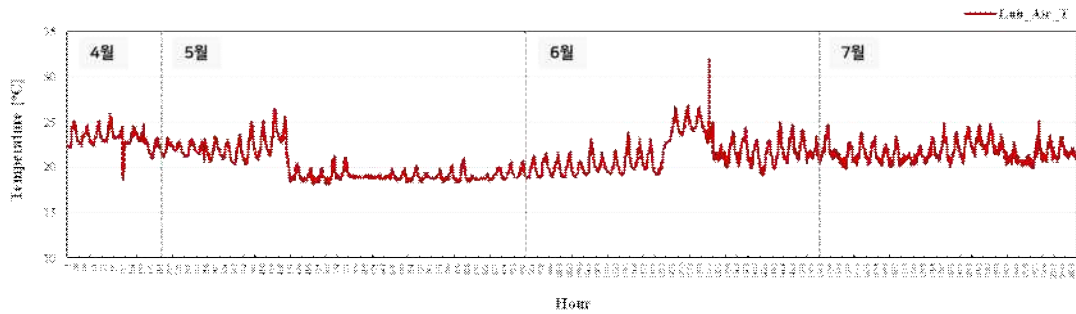
(a) 시편 후면 밀폐 전



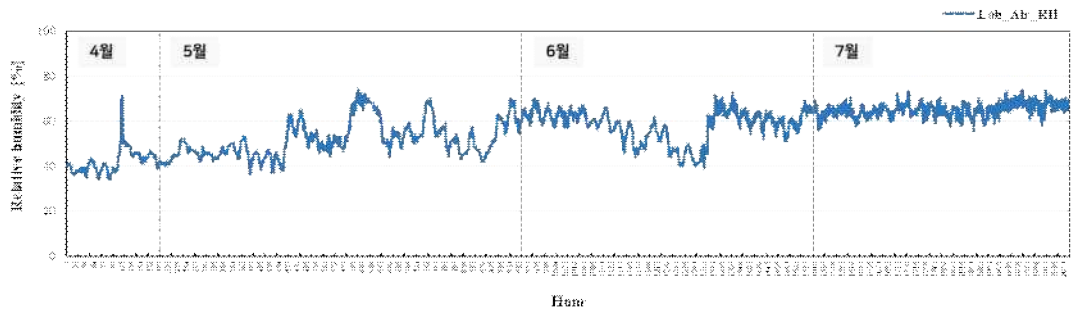
(b) 시편 후면 밀폐 후

[그림 4- 6] 시편 실험 환경 구축

[그림 4-7]은 실험 기간(4/23~7/22, 4개월)동안의 실험실 실내 온습도 분포를 나타낸다. 실내 온도([그림 3-6] (a))의 경우, 월 평균 온도는 4월에 23.2 °C, 5월에 20.2 °C, 6월에 21.5 °C, 7월에 20 °C로 4월을 제외하고 설정온도 20 °C에 근접한 온도로 유지됨을 확인하였다. 상대습도([그림 3-6] (b))의 경우, 월 평균 습도는 42%~65%로 유지되었다.



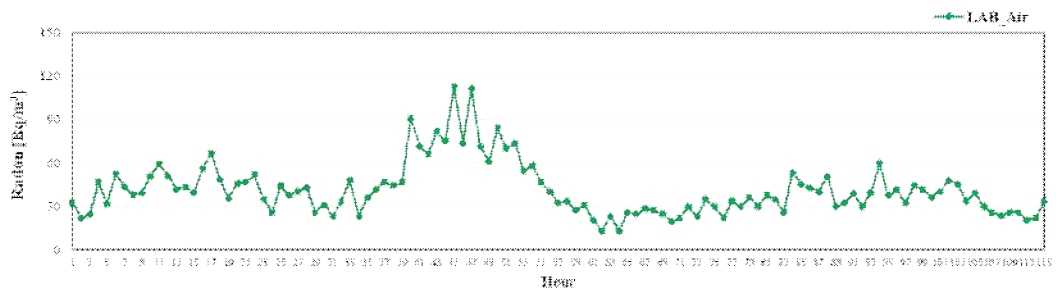
(a) 실내 온도 분포



(b) 실내 상대습도 분포

[그림 4-7] 실험 기간 동안의 실험실 실내 온습도 분포

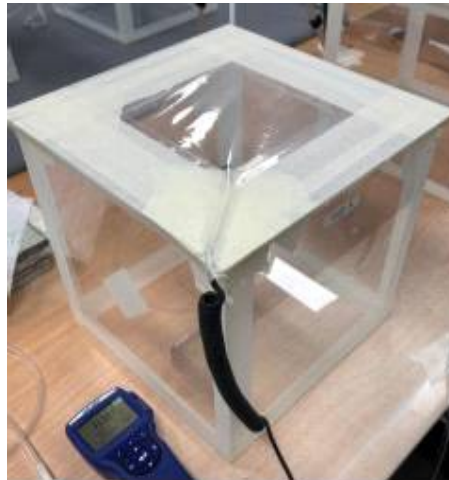
[그림 4-8]은 실험 기간 동안의 실험실 실내 공기 중 라돈 농도 분포를 나타낸다. 실내 공기 중 라돈 농도는 낮과 밤의 차이, 실내 에어컨 가동에 따른 지속적인 공기 유동 발생 등으로 인해 상대적으로 높은 변동성을 나타내었다. 실험실의 평형 시간 기준 실내 공기 중 라돈 농도는 $C_{t.eq(48)} = 35.3 \text{ Bq/m}^3$, $C_{t.eq(72)} = 32 \text{ Bq/m}^3$, $C_{t.eq(96)} = 33.5 \text{ Bq/m}^3$ 로 측정되었다.



[그림 4-8] 실험 기간 동안의 실험실 실내 공기 중 라돈 농도 분포

■ 필름형 재료 부착시 밀폐형 챔버의 기밀도 측정

2장에서 언급한 바와 같이, 밀폐 챔버에 시편을 부착하여 누적된 라돈 농도를 통해 표면 라돈 방출량을 산정하는 경우에는 밀폐 챔버의 기밀도에 따라 챔버 내 라돈 농도 및 표면 라돈 방출량이 영향을 받을 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 필름형 재료 및 실험 단계마다 밀폐 챔버의 기밀도를 측정하여 활용하였다. [그림 4-9]는 밀폐 챔버 기밀도 측정 방식을 나타낸다. 기밀도는 CO₂ 가스를 주입하여 챔버 내 농도를 4,000 ppm까지 상승시킨 후 챔버 누기에 의한 CO₂ 농도 감쇠를 바탕으로 ASTM E741-23 및 추적가스법에 의거하여 공기 교환율 추정을 통해 평가하였다.



[그림 4-9] 밀폐 챔버 기밀도 측정 방식

[표 4-2] 밀폐 챔버 공기 교환율 측정 결과

종류	필름 자체	필름 + 콘크리트 시편	필름 + 콘크리트 시편 + 벽지	필름 + 콘크리트 시편 + 벽지 + 기밀테이프
단열 필름	0.006 h ⁻¹	0.004 h ⁻¹	0.006 h ⁻¹	0.004 h ⁻¹
PE 필름	0.007 h ⁻¹	0.003 h ⁻¹	0.005 h ⁻¹	0.005 h ⁻¹
기밀 필름	0.013 h ⁻¹	0.009 h ⁻¹	0.007 h ⁻¹	0.008 h ⁻¹
방수 필름	2.04 h ⁻¹	0.19 h ⁻¹	0.01 h ⁻¹	0.01 h ⁻¹

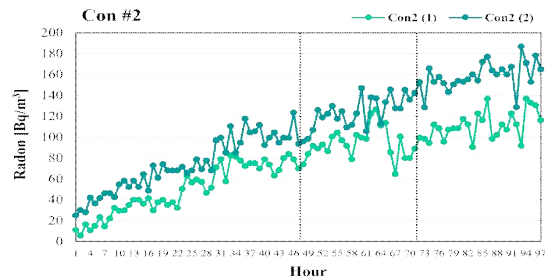
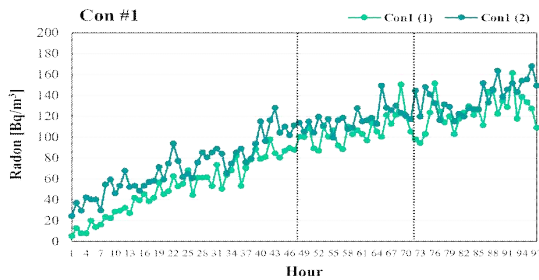
* 밀폐 챔버 자체 기밀도: 0.005 h⁻¹

[표 4-2]는 필름형 재료 및 실험 단계별 밀폐 챔버의 공기교환율 측정 결과를 나타낸다. 밀폐 챔버 자체의 공기교환율은 챔버 노출면적을 기밀 테이프로 밀봉하여 측정하였으며, 0.005 h^{-1} 를 나타내었다. 필름형 재료만 밀폐 챔버에 부착한 경우, 공기교환율은 단열 필름이 0.006 h^{-1} 으로 가장 높은 성능을 나타내었고, PE 필름 0.007 h^{-1} , 기밀 필름 0.013 h^{-1} , 방수 필름 2.04 h^{-1} 순으로 앞선 2장에서 필름형 재료의 산소투과도 시험 결과와 동일한 순위로 평가되었다. 이후 콘크리트, 벽지, 기밀 테이프를 부착함에 따라 기밀도는 순차적으로 상승하는 양상을 나타내었다. 기밀 테이프까지 모두 부착한 경우, 공기 교환율은 단열 필름이 0.004 h^{-1} 으로 가장 높은 성능을 나타내었고, PE 필름 0.005 h^{-1} , 기밀 필름 0.008 h^{-1} , 방수 필름 0.01 h^{-1} 순으로 평가되었다. 특히, 단열 필름과 PE 필름과 달리 기밀 필름과 방수 필름이 부착된 밀폐 챔버는 밀폐 챔버 자체 기밀도보다 낮은 성능을 나타내었다. 이는 앞선 산소 투과도 결과와 유사하게 CO_2 가 쉽게 투과되었기 때문인것으로 사료된다. 필름형 재료 및 실험 단계별 공기 교환율 측정 결과는 이후 표면 라돈 방출량 산정에 챔버 기밀률 λ_f 로 활용하였다(Eq.(3) 및 Eq.(5) 참조).

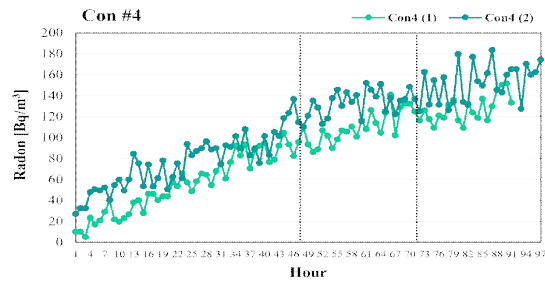
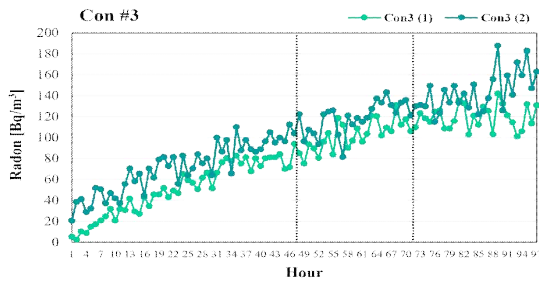
1.3. 시편을 이용한 필름형 재료의 방사성물질 측정실험 결과

■ 콘크리트 시편 자체의 라돈 방출량 측정 결과(1단계)

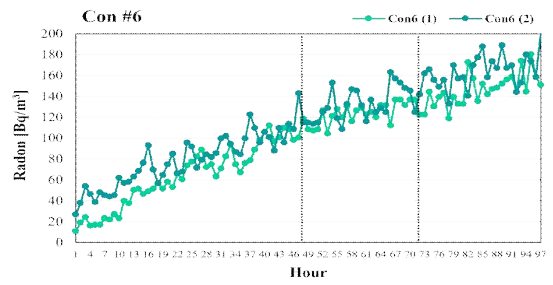
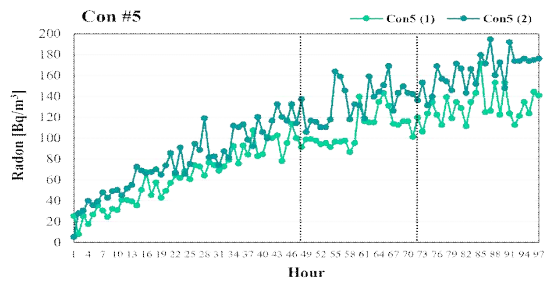
콘크리트 시편 자체의 표면 라돈 방출량 측정은 12개 콘크리트 시편에 대하여 실시하였다. 이후, 표면 라돈 방출량과 데이터의 재현성을 고려하여 4개의 시편을 제외하고 필름형 재료의 표면 라돈 방출량 측정을 위한 8개의 시편을 선정하였다. 표면 라돈 방출량은 밀폐 챔버 내 라돈 농도와 콘크리트 시편 자체의 챔버 공기 교환율 0.109 h^{-1} 를 고려하여 Eq.(3)을 통해 산출하였다. [그림 4-10]~[그림 4-15]는 12개 콘크리트 시편의 밀폐 챔버 내 라돈 농도 측정 결과를 나타낸다. 모든 측정은 데이터의 재현성을 고려하여 2회 반복 실험하였으며, 각 콘크리트 시편의 밀폐 챔버 내 라돈 농도는 2회 반복 측정의 최댓값을 활용하였다.



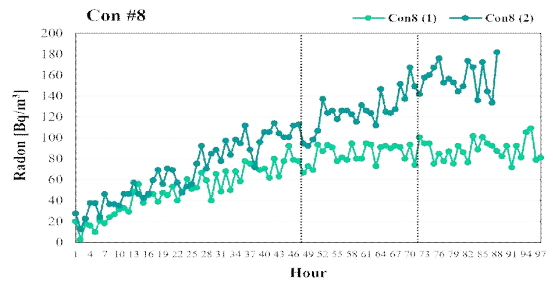
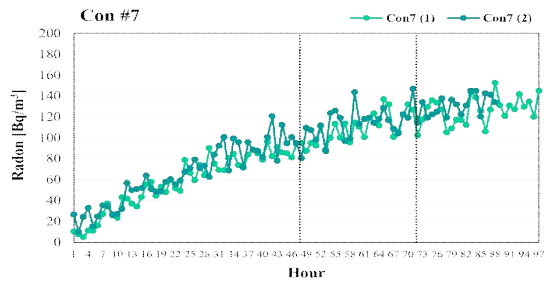
[그림 4-10] 콘크리트 시편 1-2의 밀폐 챔버 내 라돈 농도



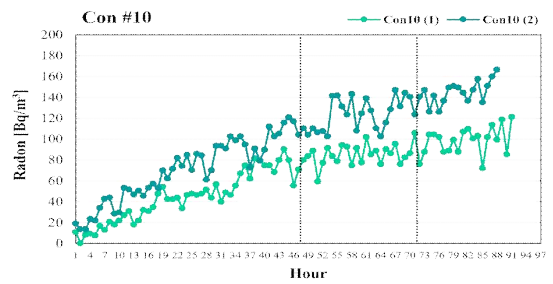
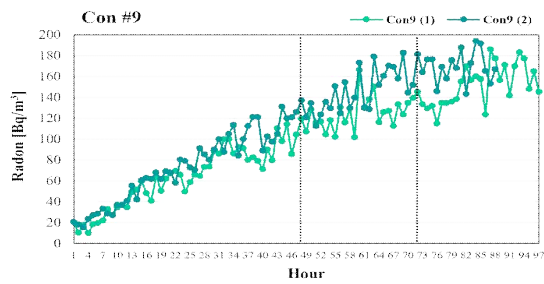
[그림 4-11] 콘크리트 시편 3-4의 밀폐 챔버 내 라돈 농도



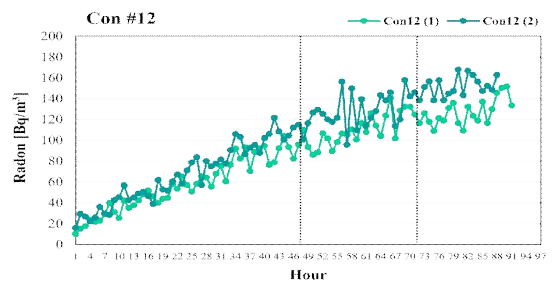
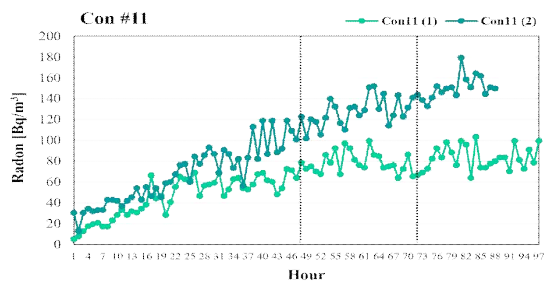
[그림 4-12] 콘크리트 시편 5-6의 밀폐 챔버 내 라돈 농도



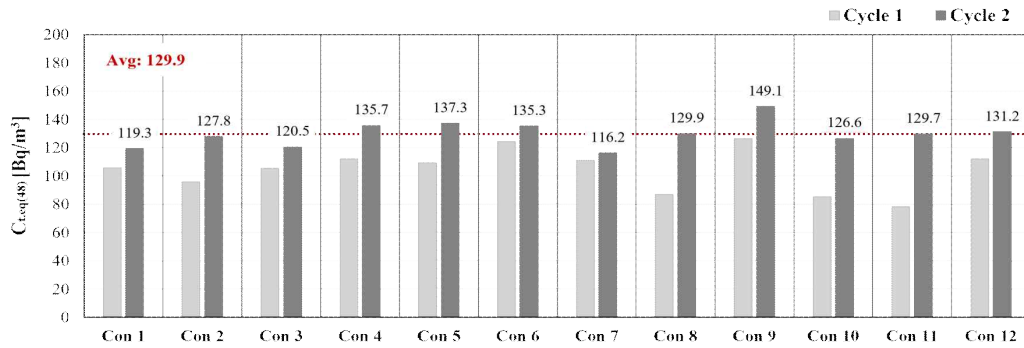
[그림 4-13] 콘크리트 시편 7-8의 밀폐 챔버 내 라돈 농도



[그림 4-14] 콘크리트 시편 9-10의 밀폐 챔버 내 라돈 농도



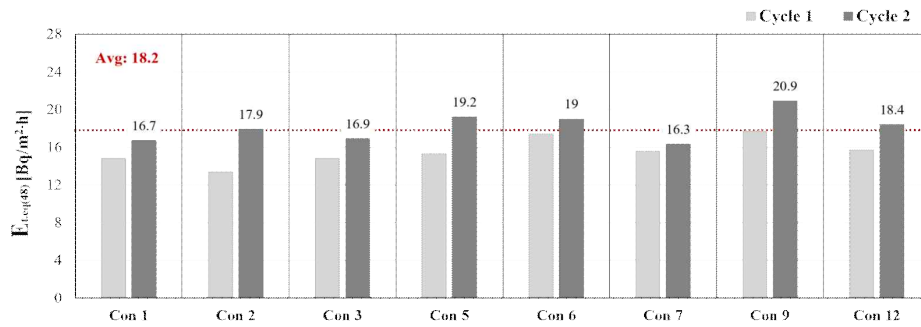
[그림 4-15] 콘크리트 시편 11-12의 밀폐 챔버 내 라돈 농도



[그림 4-16] 12개 콘크리트 시편의 밀폐 챔버 내 라돈 농도 종합

12개 콘크리트 시편 자체의 밀폐 챔버 내 라돈 농도 $C_{t,eq(48)}$ 은 [그림 4-16]에 종합적으로 제시하였다. 측정 결과, 시편 9(149.1 Bq/m^3)가 최댓값을 나타내었으며, 시편 1(119.3 Bq/m^3), 시편 2(127.8 Bq/m^3), 시편 3(120.5 Bq/m^3), 시편 4(135.7 Bq/m^3), 시편 5(137.3 Bq/m^3), 시편 6(135.3 Bq/m^3), 시편 7(116.2 Bq/m^3), 시편 8(129.9 Bq/m^3), 시편 10(126.6 Bq/m^3), 시편 11(129.7 Bq/m^3), 시편 12(131.2 Bq/m^3)로 측정되었다. 콘크리트 시편 자체의 밀폐 챔버 내 평균 라돈 농도는 129.9 Bq/m^3 을 나타내었으며, 표준편차는 9 Bq/m^3 로 12개의 시편 모두 전반적으로 변동률 6.9%의 유사한 평균 라돈 농도를 보이는 것으로 분석되었다. 따라서, 본 연구에서는 밀폐 챔버 내 라돈 농도와 누적 그래프의 균일성 및 재현성을 고려하여 시편 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 12의 8개 시편을 선정하여 필름형 재료의 표면 라돈 방출량 측정에 활용하였다.

[그림 4-17]은 선정된 8개 시편의 표면 라돈 방출량 $E_{t,eq(48)}$ 를 나타낸다. 표면 라돈 방출량은 시편 1($16.7 \text{ Bq/m}^2\text{h}$), 시편 2($17.9 \text{ Bq/m}^2\text{h}$), 시편 3($16.9 \text{ Bq/m}^2\text{h}$), 시편 5($19.2 \text{ Bq/m}^2\text{h}$), 시편 6($19 \text{ Bq/m}^2\text{h}$), 시편 7($16.3 \text{ Bq/m}^2\text{h}$), 시편 9($20.9 \text{ Bq/m}^2\text{h}$), 시편 12($18.4 \text{ Bq/m}^2\text{h}$)로 산출되었다. 콘크리트 시편 자체의 평균 표면 라돈 방출량은 $18.2 \text{ Bq/m}^2\text{h}$ 로 분석되었다.



[그림 4-17] 선정된 8개 콘크리트 시편 라돈 표면 방출량 종합

■ 필름형 재료 부착 후 라돈 방출량 측정 결과(2단계)

필름형 재료 부착 후 표면 라돈 방출량 측정은 필름형 재료당 2개의 콘크리트 시편에 대하여 실시하였다. 산소 투과도 및 기밀도 성능이 높은 순으로 PE 필름은 시편 9와 12, 단열 필름은 시편 6과 7, 기밀 필름은 시편 1과 2, 방수 필름은 시편 3과 5에 마스킹 테이프를 활용하여 [그림 4-18] (a)와 같이 부착하였다. 표면 라돈 방출량은 필름형 재료별로 콘크리트 시편에 부착된 챔버 ([그림 4-18] (b) 참조)의 공기 교환율 (PE 필름) 0.003 h^{-1} , (단열 필름) 0.004 h^{-1} , (기밀 필름) 0.009 h^{-1} , (방수 필름) 0.16 h^{-1} 를 고려하여 Eq.(3)을 통해 산출하였다. [그림 4-19]과 [그림 4-20]은 필름형 재료별 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도 측정 결과를 나타낸다. 모든 측정은 데이터의 재현성을 고려하여 2회 반복 실험하였으며, 각 콘크리트 시편의 밀폐 챔버 내 라돈 농도는 2회 반복 측정의 최댓값을 활용하였다.

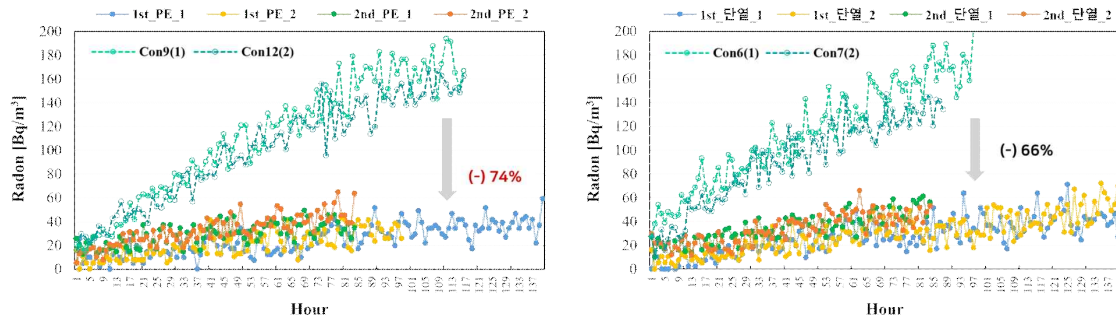


(a) 필름형 재료 부착

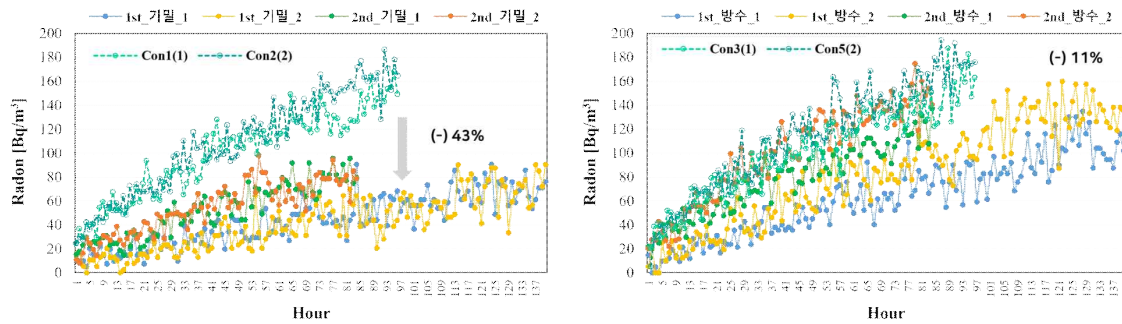


(b) 후면 밀폐 후

[그림 4-18] 필름형 재료 부착 및 측정

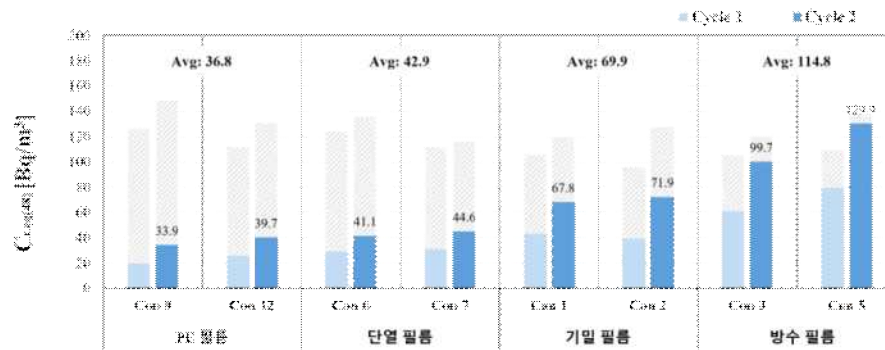


[그림 4-19] PE 및 단열 필름 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도

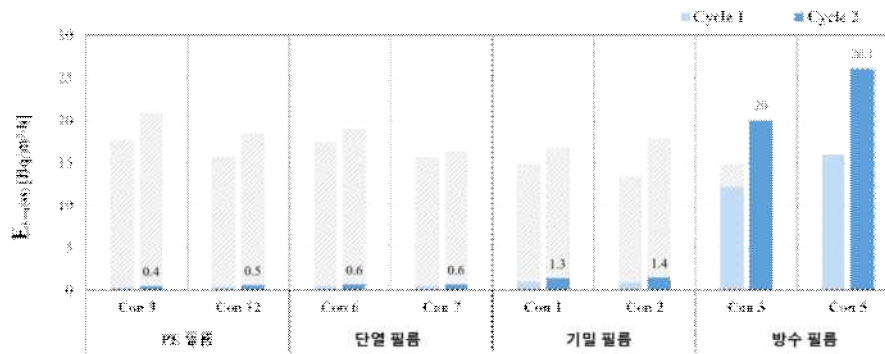


[그림 4-20] 기밀 및 방수 필름 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도

필름형 재료 부착 후 재료별 밀폐 챔버 내 라돈 농도 $C_{t.eq(48)}$ 은 [그림 4-21]에 종합적으로 제시하였다. [그림 4-21]에서 회색 막대는 콘크리트 시편 자체의 밀폐 챔버 내 라돈 농도를 의미한다. 측정 결과, 앞선 산소 투과도 결과와 달리 PE 필름이 시편 9(33.9 Bq/m^3)와 시편 12(39.7 Bq/m^3)로 평균 74%의 최대 라돈 방출 저감률을 나타내었다. 단열 필름은 시편 6(41.4 Bq/m^3)과 시편 7(44.6 Bq/m^3), 기밀 필름은 시편 1(67.8 Bq/m^3)과 시편 2(71.9 Bq/m^3), 방수 필름은 시편 5(99.7 Bq/m^3)와 시편 6(129.9 Bq/m^3)로 측정되었다. 필름형 재료별 밀폐 챔버 내 평균 라돈 농도는 PE 필름이 36.8 Bq/m^3 로 최솟값을 나타내었으며, 이후로 단열 필름 42.9 Bq/m^3 , 기밀 필름 69.9 Bq/m^3 , 방수 필름 114.8 Bq/m^3 순으로 분석되었다. 평균 라돈 방출 저감률은 PE 필름 다음으로 단열 필름 66%, 기밀 필름 43%, 방수 필름 11% 순으로 분석되었다. 이는 PE 필름의 연성이 단열 필름 보다 높아, 콘크리트 시편의 표면 거칠기에 PE 필름이 더 유연하게 대응할 수 있기 때문인 것으로 사료된다.



[그림 4-21] 필름형 재료별 밀폐 챔버 내 라돈 농도 종합

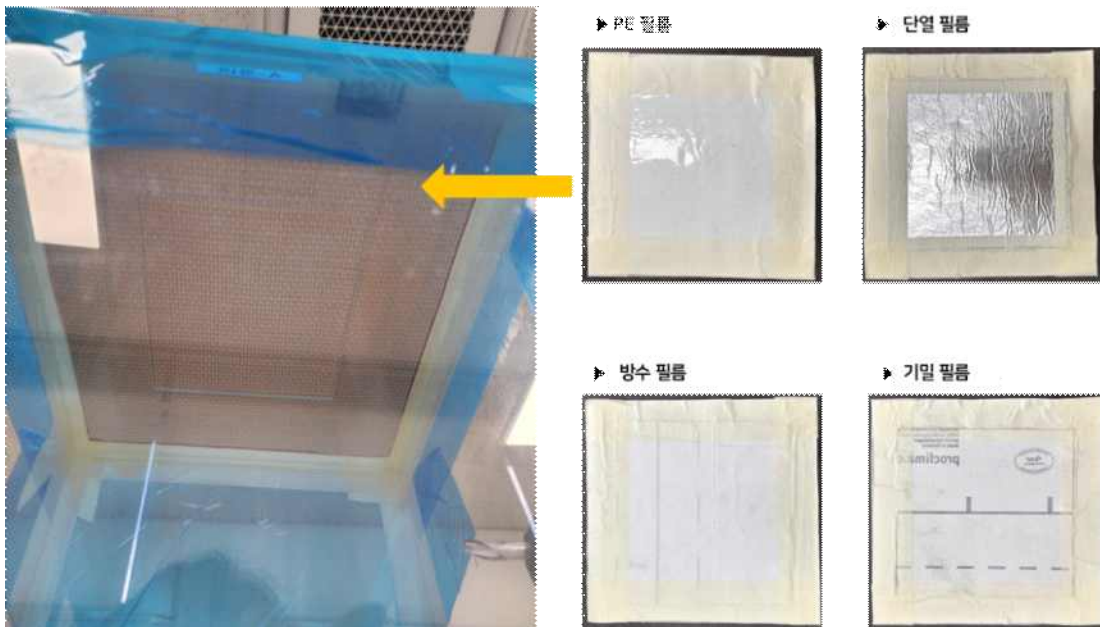


[그림 4-22] 필름형 재료별 표면 라돈 방출량 종합

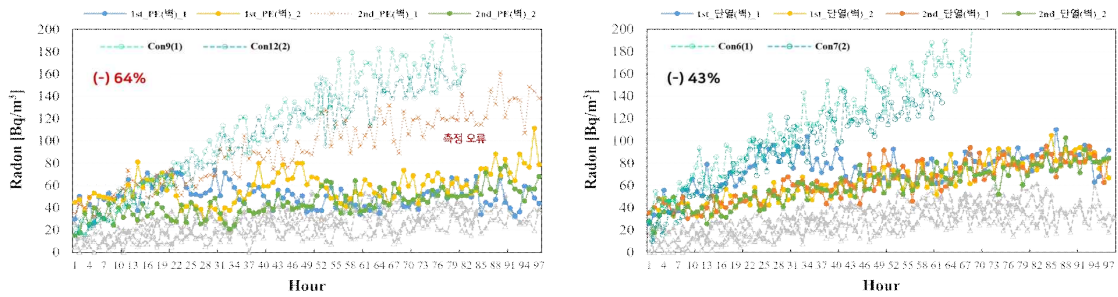
[그림 4-22]는 필름형 재료별 표면 라돈 방출량 $E_{t.eq(48)}$ 를 나타낸다. 표면 라돈 방출량은 PE 필름이 시편 9(0.4 Bq/m²·h)와 시편 12(0.5 Bq/m²·h)로 최소 표면 라돈 방출량을 나타내었다. 이후로, 단열 필름은 시편 6(0.6 Bq/m²·h)과 시편 7(0.6 Bq/m²·h), 기밀 필름은 시편 1(1.3 Bq/m²·h)과 시편 2(1.4 Bq/m²·h), 방수 필름은 시편 5(20 Bq/m²·h)와 시편 6(26.1 Bq/m²·h)으로 산출되었다. 다른 필름형 재료들과 달리, 방수 필름의 표면 라돈 방출량은 방수 필름을 부착한 밀폐 챔버의 공기교환율(0.16 h^{-1})이 다른 필름에 비해 약 30배 높게 도출됨과 함께 콘크리트 시편만 부착한 밀폐 챔버의 기밀도보다도 32배 높게 도출되어 기존 콘크리트 시편의 표면 라돈 방출량보다 높게 산출된 것으로 사료된다.

■ 벽지 시공후 라돈 방출량 측정 결과(3단계)

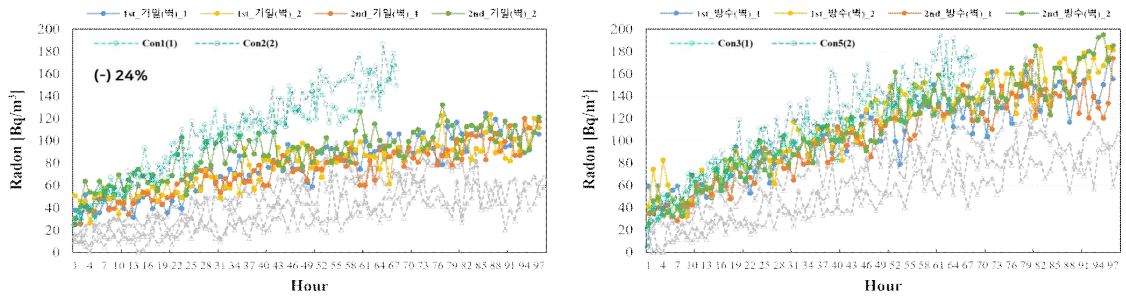
필름형 재료 위에 벽지 시공 후 표면 라돈 방출량 측정은 앞선 필름형 재료 시공과 동일하게 필름형 재료당 2개의 콘크리트 시편에 대하여 실시하였다. 벽지는 소형 공동주택 대상 세대 현장에 부착된 벽지와 동일한 재료를 활용하였다. 벽지는 마스킹 테이프를 활용하여 [그림 4-23]과 같이 필름형 재료와 밀착되도록 부착하였다. 표면 라돈 방출량은 필름형 재료별로 벽지와 함께 시편에 부착된 챔버 ([그림 4-23] 참조)의 공기 교환율 (PE 필름) 0.004 h^{-1} , (단열 필름) 0.005 h^{-1} , (기밀 필름) 0.008 h^{-1} , (방수 필름) 0.01 h^{-1} 를 고려하여 Eq.(3)을 통해 산출하였다. [그림 4-24]와 [그림 4-25]는 필름형 재료별 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도 측정 결과를 나타낸다. 모든 측정은 데이터의 재현성을 고려하여 2회 반복 실험하였으며, 각 콘크리트 시편의 밀폐 챔버 내 라돈 농도는 2회 반복 측정의 최댓값을 활용하였다.



[그림 4-23] 필름형 재료 및 벽지 시공

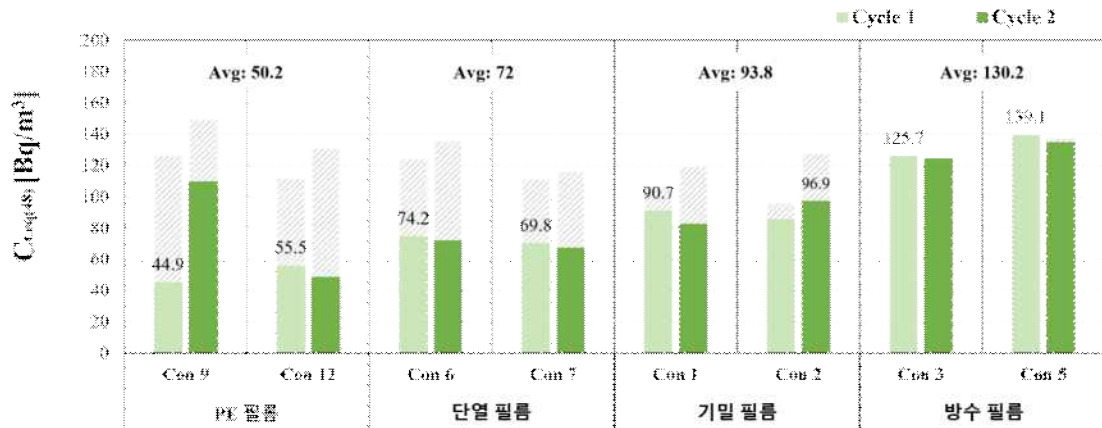


[그림 4-24] PE 및 단열필름 위 벽지 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도

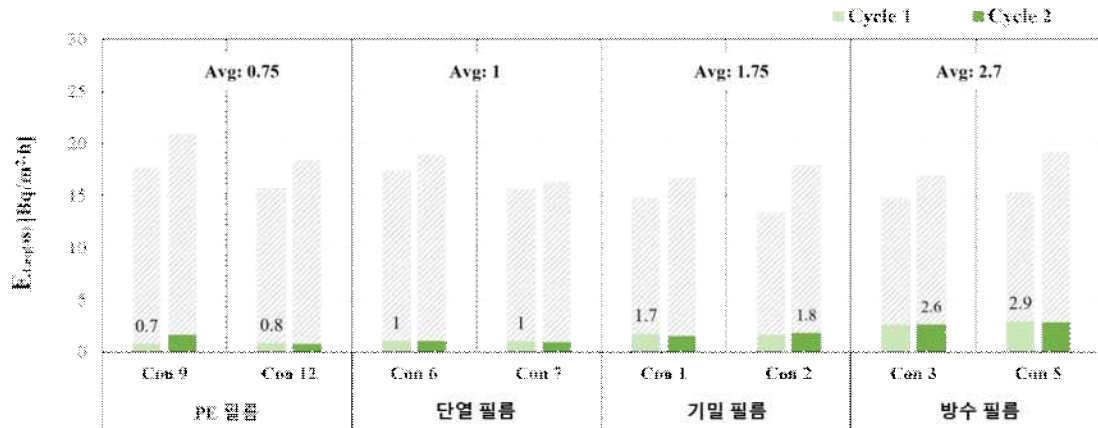


[그림 4-25] 기밀방수 및 방수필름 위 벽지 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도

벽지 시공 후 필름형 재료별 밀폐 챔버 내 라돈 농도 $C_{t,eq(48)}$ 은 [그림 4-26]에 종합적으로 제시하였다. 측정 결과, 앞선 필름형 재료와 동일하게 PE 필름이 시편 9(44.9 Bq/m^3)와 시편 12(55.5 Bq/m^3)로 평균 64%의 최대 라돈 방출 저감률을 나타내었다. 단열 필름은 시편 6(72.4 Bq/m^3)과 시편 7(69.8 Bq/m^3), 기밀 필름은 시편 1(90.7 Bq/m^3)과 시편 2(96.9 Bq/m^3), 방수 필름은 시편 5(125.7 Bq/m^3)와 시편 6(139.1 Bq/m^3)로 측정되었다. 필름형 재료별 밀폐 챔버 내 평균 라돈 농도는 PE 필름이 50.2 Bq/m^3 로 최솟값을 나타내었으며, 이후로 단열 필름 72.0 Bq/m^3 , 기밀 필름 93.8 Bq/m^3 , 방수 필름 130.2 Bq/m^3 순으로 분석되었다. 평균 라돈 방출 저감률은 PE 필름 다음으로 단열 필름 43%, 기밀 필름 24%로 분석되었으며, 방수 필름은 오히려 1% 증가하여 뚜렷한 감소를 보이지 않았다. 특히, 모든 경우에서 벽지 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도가 증가하는 추세를 나타내었다. 이는 기존에 현장에 부착된 벽지가 높은 습도 환경으로 인해 습윤한 상태에서 충분한 건조 기간 없이 실험에 활용되었기 때문인 것으로 사료된다. 재료의 흡습량은 밀폐 챔버 내 라돈 농도 증가를 야기할 가능성이 있으며, 이는 여러 선행 연구들에서 제시된 바 있다(Nam et al., 2024; Yoon et al., 2020; Akbari et al., 2013).



[그림 4-26] 필름형 재료별 벽지 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도 종합



[그림 4-27] 필름형 재료별 벽지 시공 후 표면 라돈 방출량 종합

[그림 4-27]은 필름형 재료별 벽지 시공 후 표면 라돈 방출량 $E_{t,eq(48)}$ 를 나타낸다. 표면 라돈 방출량은 PE 필름이 시편 9(0.7 Bq/m²·h)와 시편 12(0.8 Bq/m²·h)로 최소 표면 라돈 방출량을 나타내었다. 이후로, 단열 필름은 시편 6(1 Bq/m²·h)과 시편 7(1 Bq/m²·h), 기밀 필름은 시편 1(1.7 Bq/m²·h)과 시편 2(1.8 Bq/m²·h), 방수 필름은 시편 5(2.6 Bq/m²·h)와 시편 6(2.9 Bq/m²·h)으로 산출되었다. 방수 필름의 표면 라돈 방출량은 방수 필름과 벽지를 부착한 밀폐 챔버의 공기교환율(0.01 h^{-1})이 방수 필름만 부착된 챔버에 비해 약 1/10 감소됨에 따라 방수 필름만 시공한 경우에 비해 현저히 감소되었다.

■ 시편을 이용한 필름형 재료의 라돈 방출 측정결과 종합

[표 4-3]은 필름형 재료별 (1) 콘크리트 시편 자체, (2) 필름형 재료 시공 후, (3) 필름형 재료 및 벽지 시공 후의 3단계에 대한 밀폐 챔버 내 라돈 농도 $C_{t.eq(48)}$ 과 표면 라돈 방출량 $E_{t.eq(48)}$ 측정 결과를 나타낸다.

[표 4-3] 시편 활용 필름형 재료 라돈 방출 측정 결과 종합

재료			(1) 시편 자체		(2) 시편 + 필름			(3) 시편 + 필름 + 벽지		
			1차	2차	1차	2차	저감률	1차	2차	저감률
PE 필름	시편9	$C_{t.eq(48)}$	126.6	149.1	19.1	33.9	77%	44.9	109.3	70%
		$E_{t.eq(48)}$	17.7	20.9	0.2	0.4	98%	0.7	1.6	97%
	시편12	$C_{t.eq(48)}$	112.0	131.2	25.3	39.7	70%	55.5	48.4	58%
		$E_{t.eq(48)}$	15.7	18.4	0.3	0.5	97%	0.8	0.7	95%
단판 필름	시편6	$C_{t.eq(48)}$	124.3	135.3	28.7	41.1	70%	74.2	71.7	45%
		$E_{t.eq(48)}$	17.4	19.0	0.4	0.6	97%	1	1	95%
	시편7	$C_{t.eq(48)}$	111.0	116.2	30.4	44.6	62%	69.8	66.9	40%
		$E_{t.eq(48)}$	15.6	16.3	0.4	0.6	96%	1	0.9	94%
기밀 필름	시편1	$C_{t.eq(48)}$	105.9	119.3	42.8	67.8	43%	90.7	82.1	24%
		$E_{t.eq(48)}$	14.8	16.7	0.9	1.3	92%	1.7	1.5	90%
	시편2	$C_{t.eq(48)}$	95.8	127.8	38.9	71.9	44%	85.4	96.9	24%
		$E_{t.eq(48)}$	13.4	17.9	0.8	1.4	92%	1.6	1.8	90%
방수 필름	시편3	$C_{t.eq(48)}$	105.4	120.5	60.4	99.7	17%	125.7	124.4	(4% 증가)
		$E_{t.eq(48)}$	14.8	16.9	12.1	20	+19%	2.6	2.6	84%
	시편5	$C_{t.eq(48)}$	109.5	137.3	79	129.9	5%	139.1	134.6	2%
		$E_{t.eq(48)}$	15.3	19.2	15.9	26.1	+36%	2.9	2.8	85%

[표 4-3]에서와 같이, (2) 필름형 재료 시공 후와 (3) 필름형 재료 및 벽지 시공 후의 모든 단계에서 PE 필름이 밀폐 챔버 내 라돈 농도 기준 각각 74%, 64%; 표면 라돈 방출량 기준 각각 98%, 96%로 가장 우수한 라돈 방출 저감률을 나타내었다. 반면에, 단열 필름은 산소투과도 결과와 달리 밀폐 챔버 내 라돈 농도 기준 각각 66%, 43%; 표면 라돈 방출량 기준 각각 97%, 94%로 PE 필름보다 낮은 저감률을 나타내었다. 이는 PE 필름의 연성이 단열 필름보다 높아, 콘크리트 시편의 표면 거칠기에 PE 필름이 더 유연하게 대응할 수 있기 때문인 것으로 사료된다. 따라서, 본 실험 결과와 산소투과도 결과를 고려하여 가장 우수한 PE 필름을 최종 필름형 재료로 선정하였다.

본 실험 결과에서 밀폐 챔버 내 라돈 농도 $C_{t,eq(48)}$ 과 표면 라돈 방출량 $E_{t,eq(48)}$ 간에 나타나는 저감률의 큰 차이는 표면 라돈 방출량 산출에 활용되는 밀폐 챔버의 기밀도에 기인하는 것으로 분석되었다. 필름형 재료 및 시공 단계에 따른 밀폐 챔버의 기밀도 변화에 따라, 표면 라돈 방출량 저감 성능이 과대 / 과소평가 될 수 있을 것으로 사료된다. 이에 표면 라돈 방출량의 보다 객관적인 비교 분석을 위해서는 유의미하게 낮은 챔버 공기 교환율을 유지할 수 있는 밀폐 챔버 제작 및 균일한 실험 조건 마련이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 벽지가 시공된 벽체의 표면 라돈 방출량 측정에 있어 높은 습도 환경으로 인해 습윤한 상태에서 충분한 건조 기간 없이 실험에 활용되는 경우, 상대습도 증가에 따른 라돈 농도의 증가를 야기할 수 있다. 따라서, 표면 상대습도 검토를 통해 충분한 환기와 시간 이후 건조 상태에서 표면 라돈 방출량 측정이 수행되어야 할 것으로 사료된다.

2. 실물벽체를 이용한 필름형 재료의 방사성물질 방출 Mock-up 실험

2.1. 실험 개요 및 프로세스

본 절에서는 아크릴로 제작된 밀폐 챔버와 Mock-up 실물 크기 벽체를 활용하여 앞선 3장에서 최종 재료로 선정된 PE 필름의 밀폐 챔버 내 라돈 농도 측정 및 차단 성능 평가를 수행하였다. 실물 크기 벽체를 이용한 PE 필름의 라돈 방출 관련 Mock-up 실험 프로세스는 [그림 4-28]과 같다. PE 필름을 활용한 실물 크기 벽체의 밀폐 챔버 내 라돈 농도 측정은 측정점 5곳을 선정하여 수행하였다. 전체 실험은 (1) 실물 크기 벽체 자체, (2) 필름형 재료 시공 후, (3) 필름형 재료 및 벽지 시공 후의 3단계로 각 단계에 대하여 2회 반복 실험을 통해 총 30회 수행하였다. 실험 시작 전 Blower Door와 INNOVA 장비를 활용하여 Mock-up의 기밀성과 실시간 공기 교환율을 측정 및 평가하였으며, 각 단계 실험 중 환경인자로서 실내 공기 중 라돈 농도와 실내 온습도를 함께 측정하였다.



[그림 4-28] 실물 크기 벽체를 이용한 실험 프로세스

실물 크기 벽체 Mock-up 실험은 [그림 4-29]의 (a)와 같이 세종시에 위치한 LH 주택성능연구개발센터의 외단열 기후변화 챔버(12.5m³)를 활용하였다. 외단열 기후변화 챔버 내에는 [그림 4-29]의 (b)와 같이, 양 면에 3 m × 2.25 m × 0.2 m 크기의 실물 크기 벽체 콘크리트가 시공되어 있다. 오른쪽 면은 선행 연구에서 수행된 라돈 저감 도료가 도포되어 있으며, 본 실험에서는 챔버 내 좌측 콘크리트 벽면을 활용하였다. 외단열 기후변화 챔버는 [그림 4-29]의 (c)와 같이 실내 온습도 및 풍량 조건 제어를 통해 항온항습 유지가 가능하며, 일반적인 주거 건물 내 실내 온습도 조건을 고려하여 건구온도 25 °C, 상대습도 50%로 설정하였다. 각 단계 실험은 항온항습 유지를 위해 외단열 기후변화 챔버가 상시 가동된 상태에서 수행하였다.

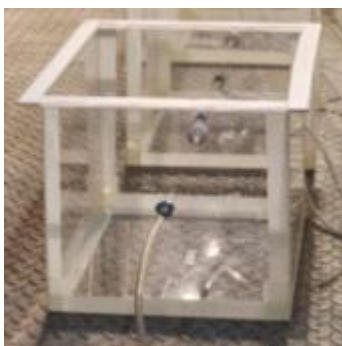


[그림 4-29] LH 주택성능연구개발센터 內 외단열 기후변화 챔버 Mock-up

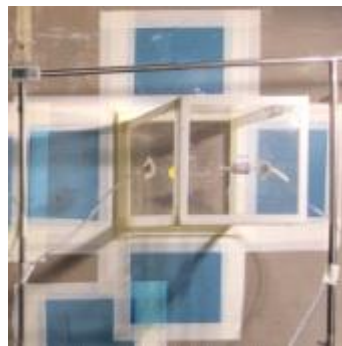
2.2. 실물벽체를 이용한 필름형 재료의 방사성물질 방출 Mock-up 실험 방법

■ 실물벽체의 밀폐 챔버 부착 방식

앞서 언급한 바와 같이, 밀폐 챔버를 표면에 부착하여 누적된 라돈 농도를 통해 표면 라돈 방출량을 산정하는 경우에는 밀폐 챔버의 기밀도에 따라 챔버 내 라돈 농도가 영향을 받을 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 외부 요인에 의한 밀폐 챔버 내 라돈 농도의 영향을 최소화하기 위하여 [그림 4-30]과 같이 3단계의 부착 방식을 통해 밀폐 챔버의 부착력을 향상시켰다. 부착의 단계 1은 [그림 4-30]의 (a)와 같이 챔버의 모서리에 양면 폼테이프를 활용하여 기본적인 부착력을 확보하였다. 단계 2는 [그림 4-30]의 (b)와 같이, 밀폐 챔버의 프레임이 부착되는 마감면에 기밀 테이프를 활용하여 표면에 넓은 면적으로 부착함으로써 부착력 향상과 동시에 밀폐 챔버에서 발생할 수 있는 누기를 최소화하였다. 또한, 밀폐 챔버의 프레임과 기밀 테이프의 각 모서리에는 마스킹 테이프를 시공하여 기밀 테이프의 들뜸을 최소화하였다. RAD7과 연결된 호스의 유입부는 BluTack과 마스킹 테이프를 활용하여 밀봉하였다. 마지막으로 단계 3은 [그림 4-30]의 (c)와 같이 지지대를 수평 방향으로 설치하여 밀폐 챔버의 부착 성능을 최대화하였다. 본 연구에서 활용한 밀폐 챔버 부착 방식은 Mock-up과 소형 공동주택을 이용한 라돈 방출 관련 실험시에도 동일하게 적용되었다.



(a)



(b)

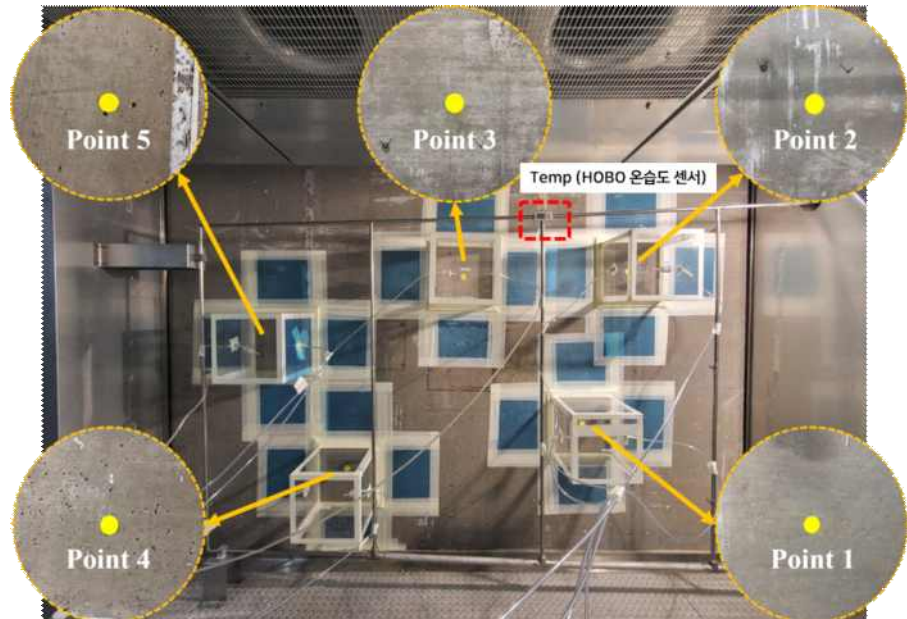


(c)

[그림 4-30] 밀폐 챔버 부착 방식

■ 실물 벽체의 밀폐형 챔버 부착 및 측정 지점 선정

[그림 4-31]은 Mock-up 실물 크기 벽체의 측정 지점 5개소를 나타낸다. 측정 지점은 콘크리트 표면의 형태와 위치를 고려하여 선정하였다. Point 1-3은 상대적으로 매끈한 표면, Point 4, 5는 상대적으로 다공의 표면으로 선정하였다.



[그림 4-31] Mock-up 실물 크기 벽체 측정 지점

2.3. 실물벽체를 이용한 Mock-up 실험 환경 분석

■ 가·감압법에 의한 실물벽체 Mock-up 기밀도 측정

Mock-up 외단열 기후변화 챔버의 공기 중 라돈 농도와 표면 라돈 방출량은 Mock-up의 기밀 성능에 따라 달라질 수 있으므로 측정 결과의 균일성 및 해석을 위해서는 Mock-up 외단열 기후변화 챔버의 기밀 성능 파악이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 [그림 4-32]와 같이 ISO 9972를 기반으로 Blower Door(Retrotec EU6101)를 활용하여 실내 가압, 감압을 통해 기밀도를 측정하였다. Blower Door 측정은 [그림 4-32]의 (a)와 같이 누기가 발생될 것으로 예상되는 챔버 내 공기 유입부 및 구멍을 기밀 테이프와 마스킹 테이프를 활용하여 밀봉한 상태로 수행하였다.



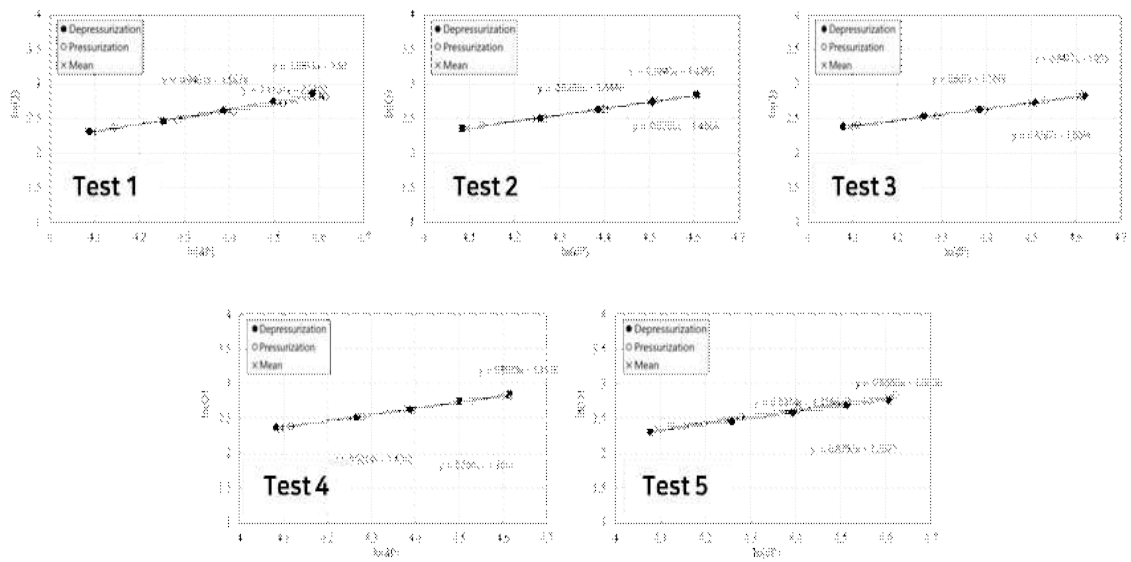
(a)



(b)

[그림 4-32] Blower Door를 이용한 Mock-up 기밀도 측정

[그림 4-33]과 [표 4-4]는 Blower Door를 활용한 기밀도 측정 결과를 나타낸다. 측정은 5회 수행하였으며, 전체 횟수의 평균값을 사용하였다. Mock-up 외단열 기후변화 챔버의 시간당 체적 유량은 50Pa 기준으로 $15.01 \text{ m}^3/\text{h}$ 로, ACH50 기준 1.2 h^{-1} 로 평가되었다. 또한, 4Pa 기준 유효누기면적은 1.61 cm^2 으로 측정되었다.



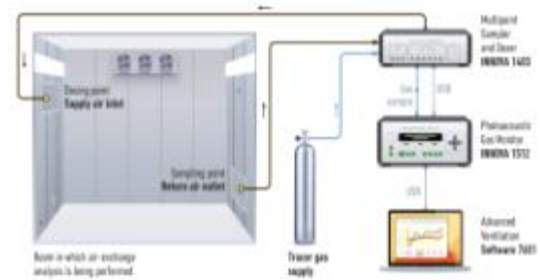
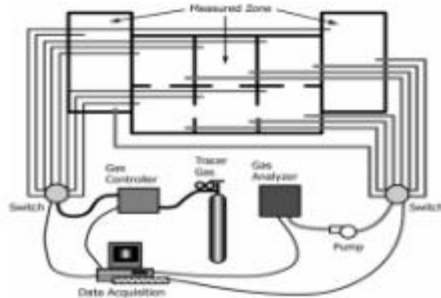
[그림 4-33] 회차별 가압 및 감압에 따른 차압-풍량 측정

[표 4-4] 가·감압법에 의한 Mock-up 기밀도 측정 결과

구 분	1회	2회	3회	4회	5회	평균
Q50 [m³/h]	14.08	15.09	15.66	15.30	14.93	15.01
Q4 [m³/h]	1.04	1.46	1.84	1.55	1.58	1.49
ACH50 [h⁻¹]	1.13	1.21	1.25	1.22	1.19	1.20
ELA4 [cm]	1.12	1.57	1.98	1.66	1.70	1.61
ELA10 [cm]	2.99	3.80	4.47	3.96	3.98	3.84

■ 추적가스법을 이용한 실물벽체 Mock-up 기밀도 측정

Blower Door를 활용한 기밀도 측정은 팬을 활용한 인위적인 가압 및 감압 과정을 통해 50Pa 조건 하에서 수행되므로, 실제 자연환경에서의 공기 교환율과 차이가 발생할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 [그림 4-34]와 같이 INNOVA(INNOVA 1512) 광음향(Photoacoustic) 가스 모니터를 활용하여 실시간 공기 교환율을 측정하였다. INNOVA를 활용한 측정은 ASTM E741-23을 기반으로 추적 가스를 활용한 일정 농도 유지법을 통해 최소 측정 개소 3개를 준수하여 수행하였다. 추적 가스는 SF₆를 활용하였으며, 10ppm의 일정 농도를 유지하였다. [그림 4-35]는 INNOVA를 활용한 실험 사진을 나타낸다. 3개의 측정 개소는 [그림 4-35]의 (b)와 같이 Mock-up 내 중앙 및 전면, 후면으로 선정하였으며, 중앙에서 SF₆를 주입하였다.



[그림 4-34] INNOVA 계통도



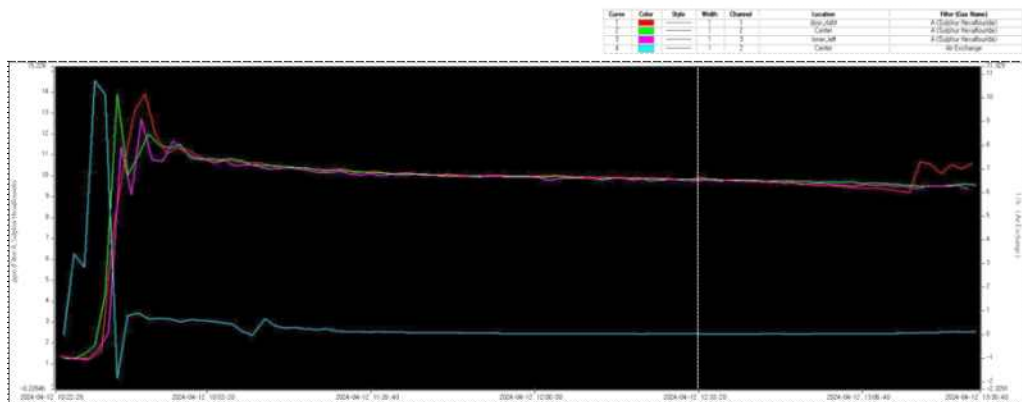
(a)



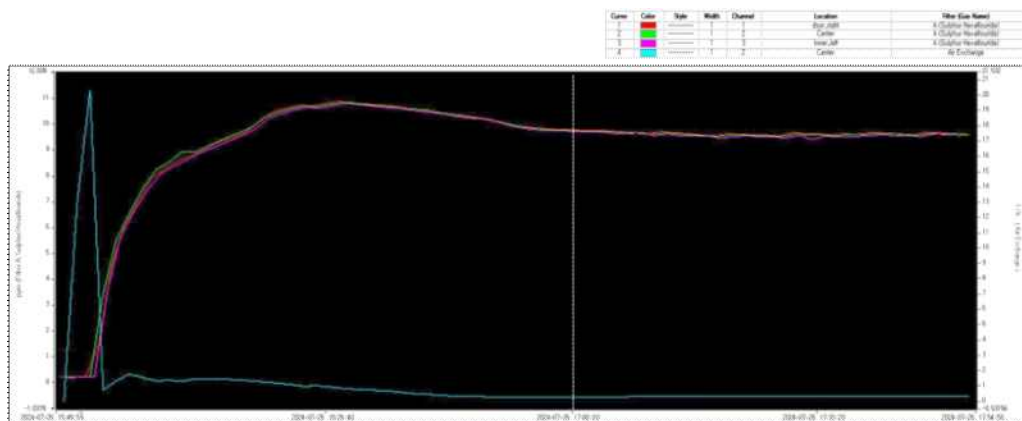
(b)

[그림 4-35] INNOVA 실험 사진

Mock-up 외단열 기후변화 챔버는 항온항습을 유지하기 위하여 순환 공기(Return Air)와 더불어 일정량의 외기를 도입하여 냉난방 후 챔버 내로 급기한다. 따라서, 챔버 가동 유무에 따라 실시간 공기 교환율이 달라질 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 챔버 미가동 및 가동 조건에서의 실시간 공기 교환율 측정을 수행하였으며, 각 조건에서의 측정 결과는 [그림 4-36] 및 [그림 4-37]과 같다. 공기 교환율은 추적 가스와 공기 교환율의 데이터 안정성을 고려하여 SF6를 주입한 시점으로부터 최소 1시간이 지난 이후로부터, 측정 종료로부터 1시간 동안의 평균값을 활용하였다. 측정 결과, Mock-up의 실시간 공기 교환율은 챔버 미가동 조건에서 0.04 ACH, 가동 조건에서 0.32 ACH로 분석되었다.



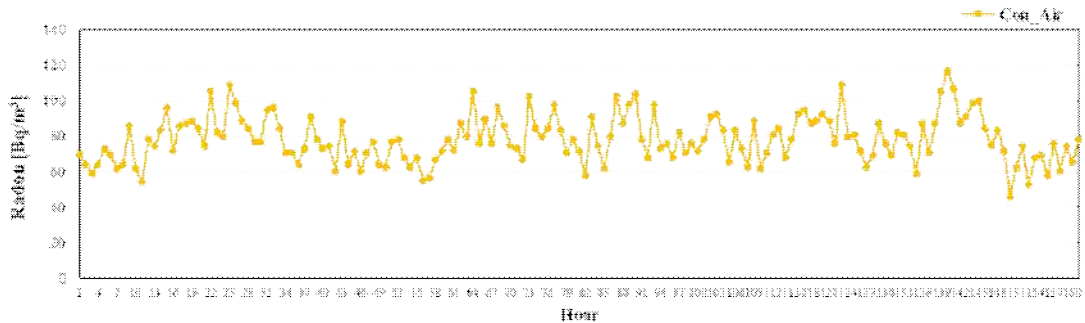
[그림 4-36] 챔버 미가동 조건에서의 실시간 공기 교환율



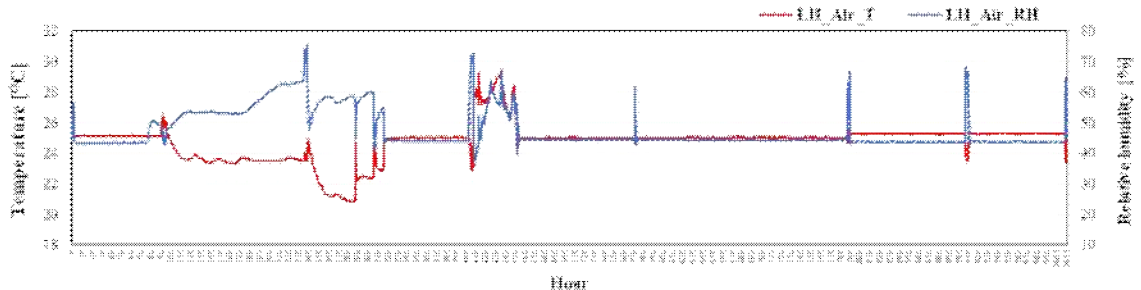
[그림 4-37] 챔버 가동 조건에서의 실시간 공기 교환율

■ 실물벽체 Mock-up 실내환경 측정

Mock-up의 실내 환경 측정은 실험 과정 중, 챔버 내의 이벤트 발생 또는 표면 라돈 방출량 변화의 원인 분석을 위하여 수행하였다. 측정은 실내 공기 중 라돈 농도 및 실내 온습도의 3가지 환경인자를 대상으로 수행하였으며, 측정 결과는 [그림 4-38] 및 [그림 4-39]와 같다. Mock-up의 실내 공기 중 라돈 농도는 측정 기간동안 표준편차가 13.1 Bq/m³인 농도 변화를 나타내었으며, 평형 시간 기준 $C_{t.eq(48)} = 76.2 \text{ Bq/m}^3$, $C_{t.eq(72)} = 81.1 \text{ Bq/m}^3$, $C_{t.eq(96)} = 80.1 \text{ Bq/m}^3$, $C_{t.eq(120)} = 84.4 \text{ Bq/m}^3$ 의 실내 라돈 농도 기준 이하로 측정되었다. 이는 챔버가 가동되는 경우, 0.3 ACH의 공기 교환이 원인인 것으로 사료된다. 실내 건구온도는 평균 24.8 °C, 상대 습도는 평균 47.4%로 설정값인 건구온도 25 °C, 상대습도 50%로 유지됨을 나타내었다. [그림 4-39]에서 나타나는 상대습도의 간헐적 상승은 측정 기간동안 챔버 내 습도 유지 장치의 고장으로 인한 결과임을 밝힌다.



[그림 4-38] Mock-up 실내 공기 중 라돈 농도 측정 결과

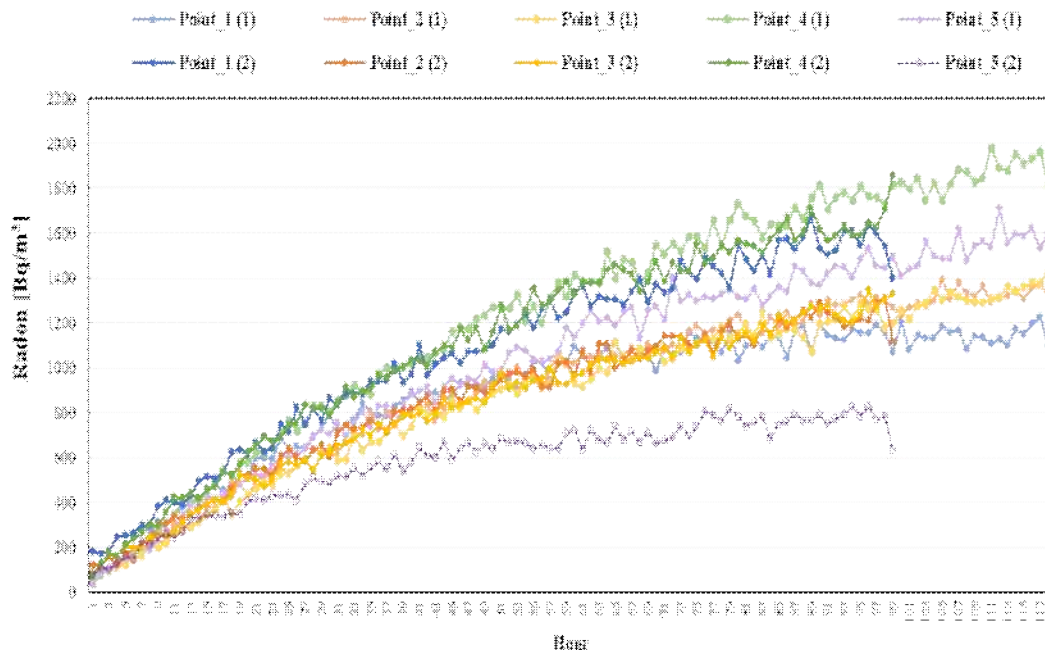


[그림 4-39] Mock-up 실내 온습도 측정 결과

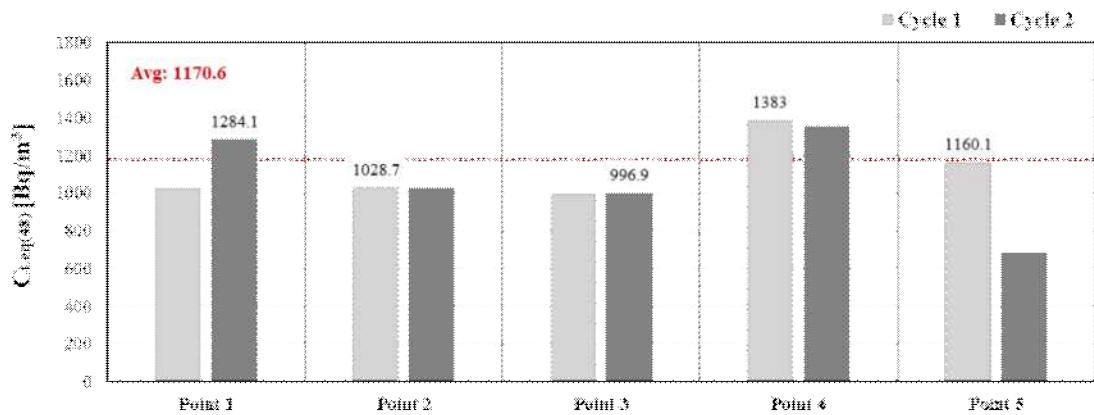
2.4. 실물벽체를 이용한 필름형 재료의 방사성물질 방출 Mock-up 실험 결과

■ 실물벽체 자체 표면 라돈 방출량 측정 결과(1단계)

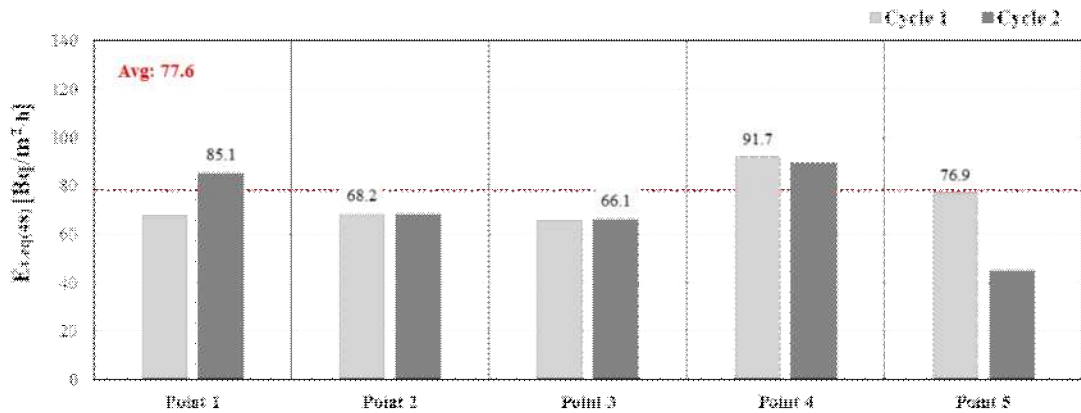
실물 크기 벽체 자체의 표면 라돈 방출량은 벽체 자체 표면에 부착한 밀폐 챔버의 공기 교환율 0.213 h^{-1} 을 고려하여 Eq.(3)을 통해 산출하였다. 측정은 데이터의 재현성을 고려하여 2회 반복 실험하였으며, 2회 반복 측정의 최댓값을 활용하였다. [그림 4-40]은 실물 크기 벽체 자체의 측정 지점 5개소에 대한 밀폐 챔버 내 라돈 농도의 시계열 데이터를 나타내며, 측정 지점 5개소의 밀폐 챔버 내 라돈 농도 $C_{t,eq(48)}$ 은 [그림 4-41]에 종합적으로 제시하였다. 측정 결과, Point 4(1383 Bq/m^3)가 최댓값을 나타내었으며, Point 1(1284.1 Bq/m^3), Point 2(1028.7 Bq/m^3), Point 3(996.9 Bq/m^3), Point 5(1160.1 Bq/m^3)으로 측정되었다. 실물 크기 벽체 자체의 측정 지점 5개소 평균 밀폐 챔버 내 라돈 농도는 1170.6 Bq/m^3 을 나타내었으며, 표준편차는 164.6 Bq/m^3 로 14.1%의 변동률을 나타내었다. [그림 4-40]과 [그림 4-41]에서 Point 5의 2회차 측정값은 측정 과정에서 지지대의 탈락으로 인한 밀폐 챔버의 기밀도 변화로 인해 상대적으로 낮은 방출량을 나타낸 것으로 사료된다.



[그림 4-40] 실물 크기 벽체 자체 측정 지점별 밀폐 챔버 내 라돈 농도



[그림 4-41] 실물 크기 벽체 자체 밀폐 챔버 내 라돈 농도 종합



[그림 4-42] 실물 크기 벽체 자체 표면 라돈 방출량 종합

[그림 4-42]는 측정 지점 5개소의 실물 크기 벽체 자체 표면 라돈 방출량 $E_{t,eq(48)}$ 를 나타낸다. 표면 라돈 방출량은 Point 1(85.1 Bq/m²·h), Point 2(68.2 Bq/m²·h), Point 3(66.1 Bq/m²·h), Point 4(91.7 Bq/m²·h), Point 5(76.9 Bq/m²·h)로 산출되었다. 실물 크기 벽체 자체의 평균 표면 라돈 방출량은 77.6 Bq/m²·h로 분석되었다.

■ 필름형 재료 시공 후 표면 라돈 방출량 측정 결과(2단계)

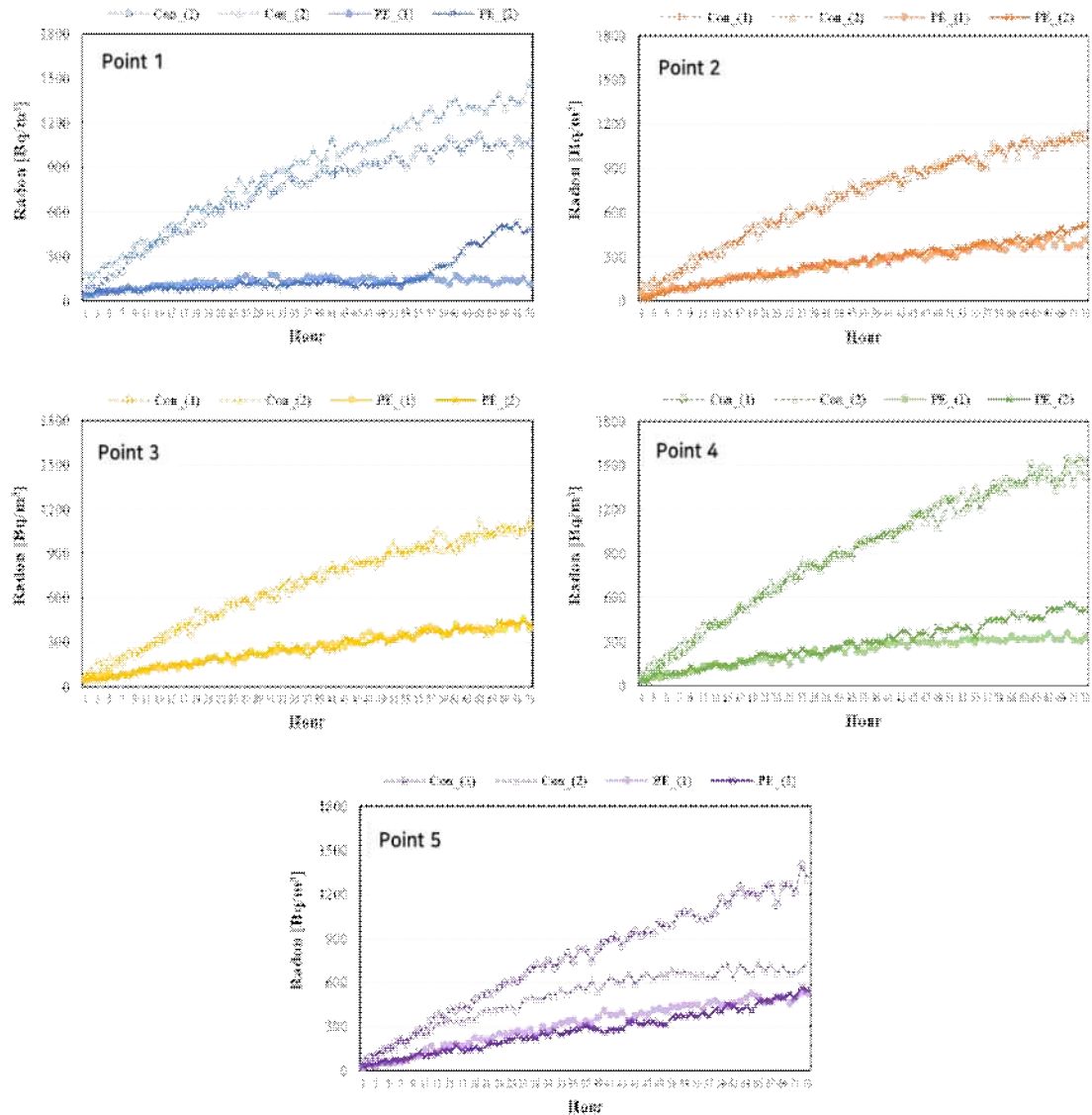
Mock-up 실물 크기 벽체에 대하여 필름형 재료 시공은 앞선 3장에서 최종 재료로 선정된 PE 필름을 활용하여 [그림 4-43]과 같이 수행하였다. PE 필름은 봉투 붙임 방식으로 벽체에 PE의 가장자리만 실리콘과 실리콘 테이프를 활용하여 부착하였다. 따라서, PE 필름은 벽체에 모든 면이 완전하게 밀착되지 않고 가장자리를 제외한 면은 벽체에서 떠 있는 형태로 유지된다. 이에 앞선 2절에서 언급한 바와 같이 지지대를 수평 방향으로 설치하여 밀폐 챔버의 부착 성능을 최대화함과 동시에 밀폐 챔버가 떠 있는 PE 필름의 형태로 인해 쳐지지 않도록 하였다. 실물 크기 벽체에 PE 필름 시공 후 표면 라돈 방출량은 PE 필름이 시공된 벽체 표면에 부착한 밀폐 챔버의 공기 교환율 0.009 h^{-1} 을 고려하여 Eq.(3)을 통해 산출하였다. 밀폐 챔버의 기밀도는 PE 필름에 의해 실물 벽체 자체 표면에 부착한 밀폐 챔버의 기밀도보다 현저히 높게 향상되었다. 측정은 데이터의 재현성을 고려하여 2회 반복 실험하였으며, 2회 반복 측정의 최댓값을 활용하였다.



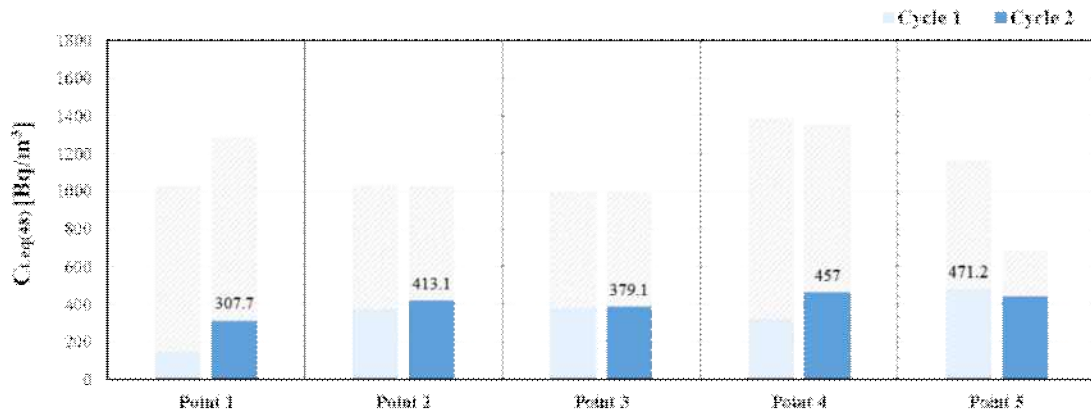
[그림 4-43] Mock-up PE 필름 시공 및 챔버 부착

[그림 4-44]는 측정 지점 5개소에 대한 PE 필름 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도의 시계열 데이터를 나타내며, 측정 지점 5개소의 밀폐 챔버 내 라돈 농도 $C_{t.eq(48)}$ 은 [그림 4-45]에 종합적으로 제시하였다. 측정 결과, Point 1이 307.7 Bq/m^3 로 76%의

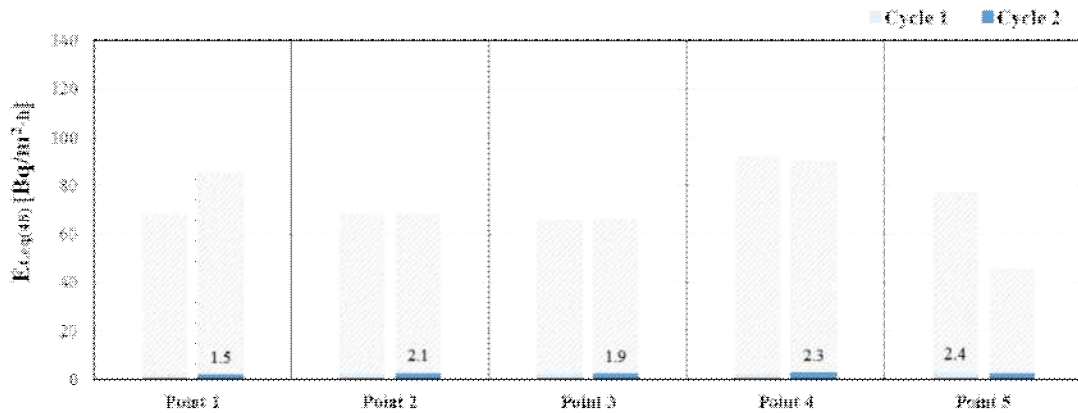
최대 라돈 방출 저감률을 나타내었으며, Point 2(413.1 Bq/m^3)가 60%, Point 3(379.1 Bq/m^3)이 62%, Point 4(457 Bq/m^3)가 67%, Point 5(471.2 Bq/m^3)가 59%로 분석되었다. 밀폐 챔버 내 평균 라돈 농도는 405.6 Bq/m^3 로 65%의 평균 라돈 방출 저감률을 나타내었다.



[그림 4-44] PE 필름 시공 후 측정 지점별 밀폐 챔버 내 라돈 농도



[그림 4-45] PE 필름 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도 종합

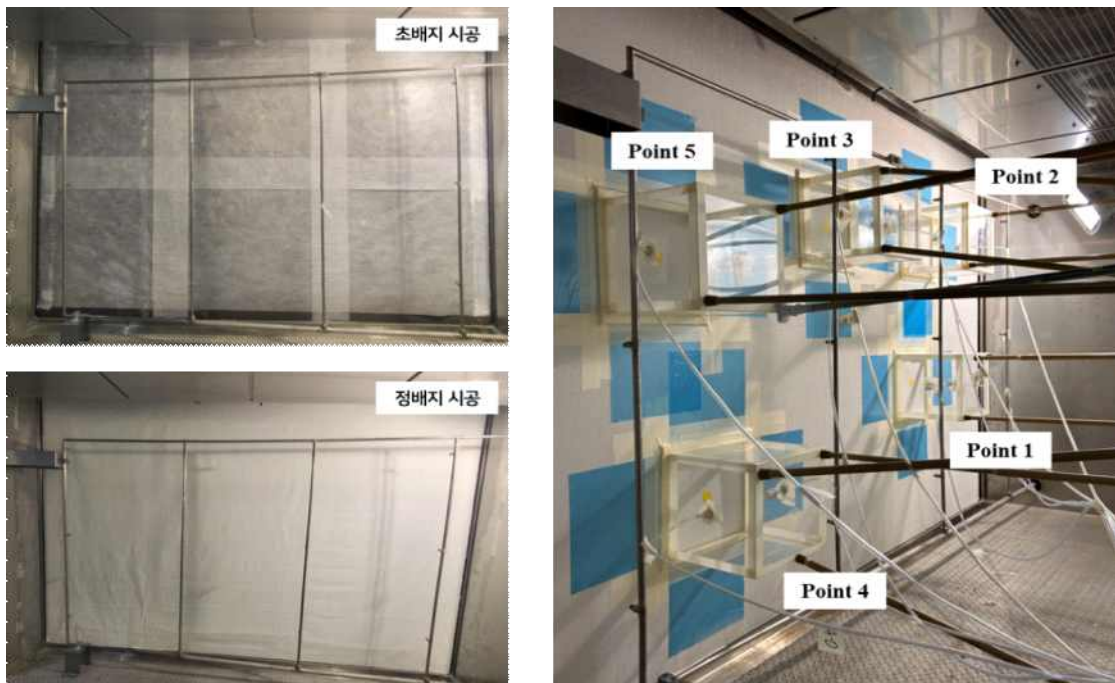


[그림 4-46] PE 필름 시공 후 표면 라돈 방출량 종합

[그림 4-46]은 측정 지점 5개소에 대한 PE 필름 시공 후 표면 라돈 방출량 $E_{t.eq(48)}$ 를 나타낸다. PE 필름 시공에 따른 표면 라돈 방출 저감률은 Point 1이 1.5 Bq/m²·h로 98%, Point 2(2.1 Bq/m²·h)가 97%, Point 3(1.9 Bq/m²·h)이 97.1%, Point 4(2.3 Bq/m²·h)가 97.5%, Point 5(2.4 Bq/m²·h)가 96.9%로 산출되었다. 평균 표면 라돈 방출량은 2.0 Bq/m²·h로 97.3%의 평균 라돈 표면 방출 저감률을 나타내었다.

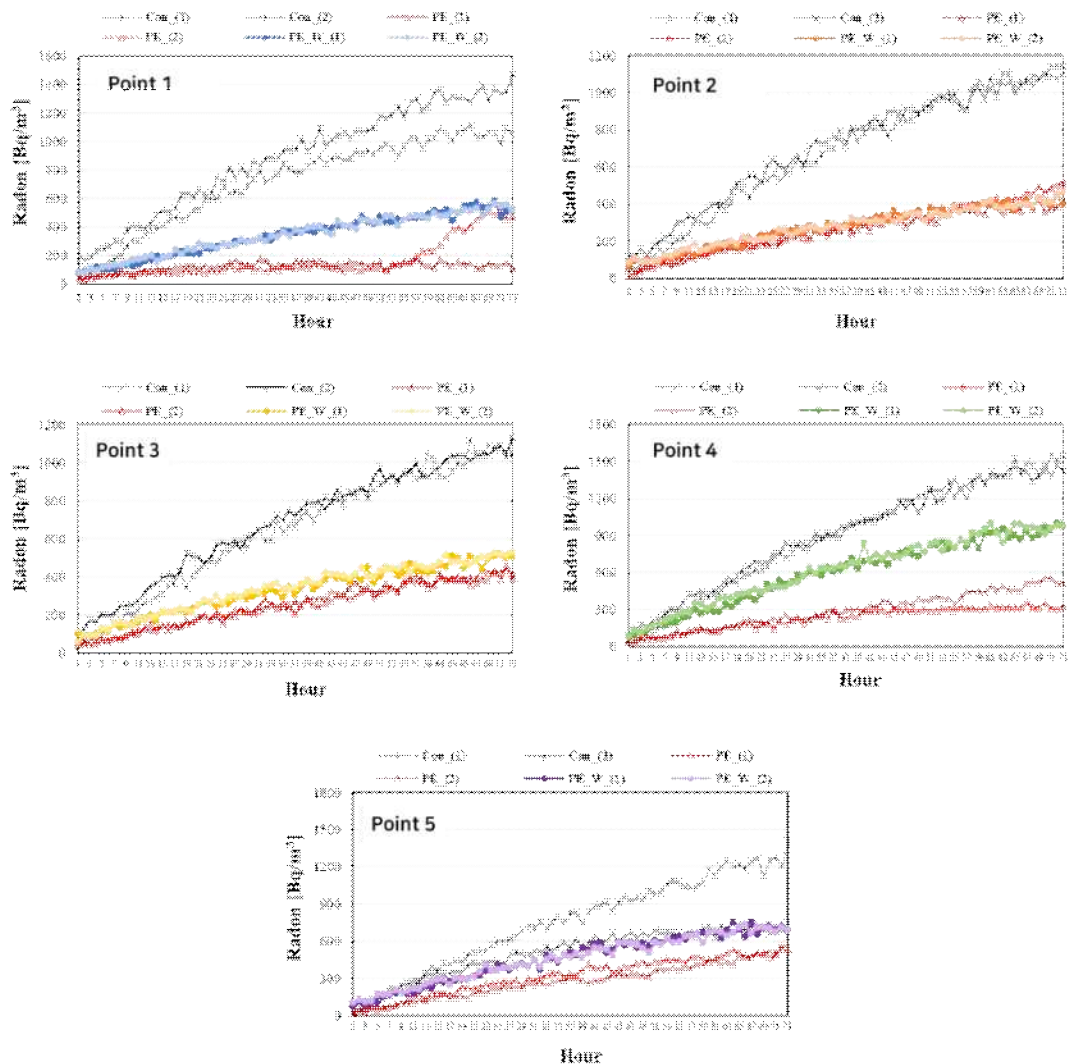
■ 벽지 시공 후 표면 라돈 방출량 측정 결과(3단계)

3단계로서 Mock-up 실물 크기 벽체에 대하여 필름형 재료 시공 면 위의 벽지 시공은 [그림 4-47]과 같이 수행하였다. 벽지는 앞선 PE 필름과 동일하게 봉투 붙임 방식으로 벽체에 초배지의 가장자리만 풀칠하여 부착하고, 정배지는 초배지와 밀착시켜 초배지와 정배지가 함께 벽에서 떨어져 도배면의 평활도를 유지하도록 시공하였다. 따라서, 벽지는 벽체에 모든 면이 완전하게 밀착되지 않고 가장자리를 제외한 면은 벽체에서 떠 있는 형태로 유지된다. 이에 지지대를 수평 방향으로 설치하여 밀폐 챔버의 부착 성능을 최대화함과 동시에 밀폐 챔버가 떠 있는 벽지의 형태로 인해 처지지 않도록 하였다. 실물 크기 벽체에 PE 필름 및 벽지 시공 후 표면 라돈 방출량은 PE 필름 및 벽지가 시공된 벽체 표면에 부착한 밀폐 챔버의 공기교환율 0.021 h^{-1} 을 고려하여 Eq.(3)을 통해 산출하였다. 밀폐 챔버의 기밀도는 종이 재질의 벽지에 의해 실물 벽체 자체 표면에 부착한 밀폐 챔버의 기밀도에 비해서는 높게 향상되었으나, PE 필름만 시공한 경우에 비해서는 감소하였다. 측정은 데이터의 재현성을 고려하여 2회 반복 실험하였으며, 2회 반복 측정의 최댓값을 활용하였다.

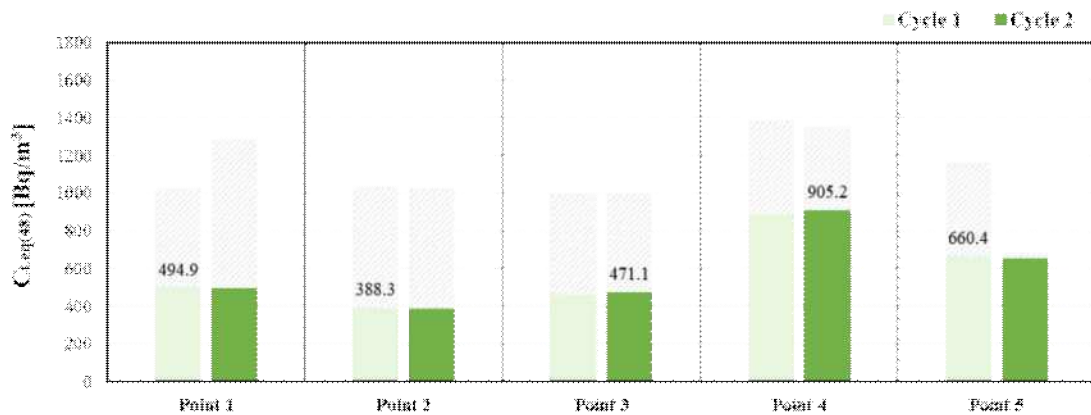


[그림 4-47] Mock-up 벽지 시공 및 챔버 부착

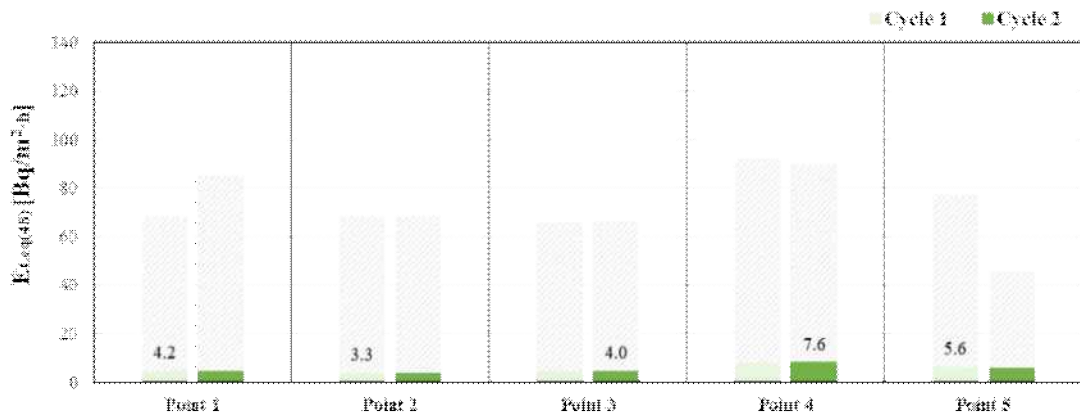
[그림 4-48]은 측정 지점 5개소에 대한 PE 필름 및 벽지 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도의 시계열 데이터를 나타내며, 측정 지점 5개소의 밀폐 챔버 내 라돈 농도 $C_{t.eq(48)}$ 은 [그림 4-49]에 종합적으로 제시하였다. [그림 4-48]의 범례에서 W는 wallpaper의 약자로 벽지 시공 후를 의미한다. 측정 결과, Point 2가 388.3 Bq/m³로 62%의 최대 라돈 방출 저감률을 나타내었으며, Point 1(494.9 Bq/m³)이 61%, Point 3(471.1 Bq/m³)이 53%, Point 4(905.2 Bq/m³)가 35%, Point 5(660.4 Bq/m³)가 43%로 측정되었다. 밀폐 챔버 내 평균 라돈 농도는 584 Bq/m³로 51%의 평균 라돈 방출 저감률을 나타내었다.



[그림 4-48] PE 필름 및 벽지 시공 후 측정 지점별 밀폐 챔버 내 라돈 농도



[그림 4-49] PE 필름 및 벽지 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도 종합



[그림 4-50] PE 필름 및 벽지 시공 후 표면 라돈 방출량 종합

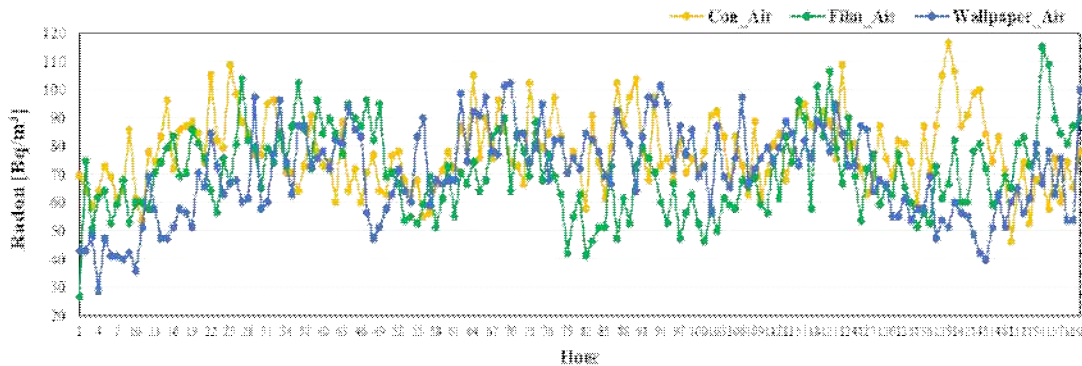
[그림 4-50]은 측정 지점 5개소에 대한 PE 필름 및 벽지 시공 후 표면 라돈 방출량 $E_{t.eq(48)}$ 를 나타낸다. 표면 라돈 방출 저감률은 Point 1이 4.2 Bq/m²·h로 95%, Point 2(3.3 Bq/m²·h)가 95%, Point 3(4.0 Bq/m²·h)이 94%, Point 4(7.6 Bq/m²·h)가 92%, Point 5(5.6 Bq/m²·h)가 93%로 산출되었다. 평균 표면 라돈 방출량은 4.9 Bq/m²·h로 94%의 평균 라돈 방출 저감률을 나타내었다.

■ 실물벽체 Mock-up 실험 결과 종합

[표 4-5]는 (1) 벽체 자체, (2) PE 필름 시공 후, (3) PE 필름 및 벽지 시공 후 총 3 단계의 5개 지점에서 밀폐 챔버 내 라돈 농도 $C_{t.eq(48)}$ 과 표면 라돈 방출량 $E_{t.eq(48)}$ 측정 결과를 정리한 것이다. 실물 크기 벽체에 PE 필름만 시공한 경우 평균 라돈 방출 저감률은 $C_{t.eq(48)}$ 에서 65%, $E_{t.eq(48)}$ 에서 97%로 분석되었으며, 벽지를 함께 시공한 경우 평균 저감률은 $C_{t.eq(48)}$ 에서 51%, $E_{t.eq(48)}$ 에서 94%로 PE 필름만 부착하는 경우에 비해 감소되는 양상을 나타내었다. 이는 앞선 콘크리트 시편 실험과 유사하게 벽지 부착을 위해 활용된 접착용 풀에 따른 벽지의 습윤으로 인한 영향 때문인것으로 사료된다.

[표 4-5] 실물벽체 Mock-up에서의 필름형 재료 라돈 방출 측정 결과 종합

지점		(1) 벽체 자체		(2) 벽체 + PE			(3) 벽체 + PE + 벽지		
		1차	2차	1차	2차	저감률	1차	2차	저감률
밀폐챔버 공기 교환율 [h^{-1}]		0.213		0.009			0.021		
Point 1	$C_{t.eq(48)}$	1024.5	1284.1	139.9	307.7	76%	494.9	491.7	61%
	$E_{t.eq(48)}$	67.9	85.1	0.7	1.5	98%	4.2	4.2	95%
Point 2	$C_{t.eq(48)}$	1028.7	1025.5	370.8	413.1	60%	388.3	384.4	62%
	$E_{t.eq(48)}$	68.2	68.0	1.9	2.1	97%	3.3	3.2	95%
Point 3	$C_{t.eq(48)}$	991.6	996.9	377.9	379.1	62%	458.5	471.1	53%
	$E_{t.eq(48)}$	65.7	66.1	1.9	1.9	97%	3.9	4.0	94%
Point 4	$C_{t.eq(48)}$	1383	1349.5	315.7	457	67%	881.6	905.2	35%
	$E_{t.eq(48)}$	91.7	89.5	1.6	2.3	97%	7.4	7.6	92%
Point 5	$C_{t.eq(48)}$	1160.1	680	471.2	436.5	59%	660.4	650	43%
	$E_{t.eq(48)}$	76.9	45.1	2.4	2.2	97%	5.6	5.5	93%
평균 저감률				$C_{t.eq(48)}$		$E_{t.eq(48)}$	$C_{t.eq(48)}$		$E_{t.eq(48)}$
				65%		97%	51%		94%



[그림 4-51] 단계별 Mock-up 공기 중 라돈 농도

PE 필름을 벽체를 비롯한 주요 콘크리트 구조체에 활용하는 PE 필름을 최종 목적은 실내 라돈 농도를 권고 기준 148 Bq/m^3 이하로 유지하기 위함이다. 따라서, PE 필름의 라돈 방출 저감률을 평가하기 위해서는 표면 방출률 뿐만 아니라 실내 공기 중 라돈 농도의 저감 효과를 파악하는 것이 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 (1) 벽체 자체, (2) PE 필름 시공 후, (3) PE 필름 및 벽지 시공 후의 3단계에 대해 각 단계별 Mock-up의 실내 공기 중 라돈 농도를 측정하여 라돈 방출 저감 효과를 분석하였으며 분석 결과는 [그림 4-51]과 같다. [그림 4-51]에 나타난 바와 같이, 모든 단계에서 챔버 가동에 따른 공기 교환으로 인해 공기 중 라돈은 포화 농도를 나타내지 않았다. 그럼에도 불구하고, 평형 시간 120시간 기준 실내 공기 중 라돈 농도 $C_{t,eq}(120)$ 는 벽체 자체에서 84.4 Bq/m^3 , PE 필름 시공 후 67.5 Bq/m^3 , PE 필름 및 벽지 시공 후 63.5 Bq/m^3 로 단계에 따라 PE 필름 시공 후 20%, PE 필름 및 벽지 시공 후 25% 저감 가능한 것으로 분석되었다. 실내 공기 중 라돈 농도의 데이터 분포를 고려하여 평균 농도를 기준으로 분석하는 경우에는 벽체 자체에서 $78.3 \pm 13.1 \text{ Bq/m}^3$, PE 필름 시공 후 $70.6 \pm 14.8 \text{ Bq/m}^3$, PE 필름 및 벽지 시공 후 $70.4 \pm 16.0 \text{ Bq/m}^3$ 로 단계에 따라 PE 필름 시공 후 9.8%, PE 필름 및 벽지 시공 후 10.1%의 저감을 나타내었다. 또한, 표면 라돈 방출량과 달리 5~7일의 시간(120~160h) 이후 공기 중 라돈 농도는 벽지 시공 단계에서 PE 필름만 시공한 경우에 비해 최대 5%, 평균 0.3%의 추가 저감을 나타내었다. 이는 충분한 시간이 지남에 따라 벽지에 도포된 접착용 풀이 건조되면서 벽지의 습윤으로 인한 영향이 감소되기 때문인 것으로 사료된다.

3. 소형 공동주택에서 필름형 재료의 방사성물질 방출량 현장 실험

3.1. 실험 개요 및 프로세스

본 실험에서는 실제 주거환경에서 PE 필름의 라돈 방출 저감 효과를 분석하기 위하여 공동주택 1세대를 활용하여 밀폐 챔버 내 라돈 농도 측정 및 차단 성능 평가를 수행하였다. 측정 세대는 구조가 단순하고, 작은 체적으로 실내 라돈 농도에 영향을 주는 요인을 최소화 할 수 있는 소형 평형 세대를 대상으로 하였다. 소형 공동주택 1세대를 이용한 현장 실험 프로세스는 [그림 4-52]와 같다. 밀폐 챔버 내 라돈 농도 측정은 내력벽을 대상으로 측정점 3곳을 선정하여 수행하였다. 전체 실험은 (1) 기존 벽체가 부착된 기존 벽체, (2) 기존 벽체의 벽지 철거 후, (3) 실내 벽체 위 필름형 재료 시공 후, (4) 필름형 재료 시공면 위 벽지 시공 후의 4단계로 각 단계에 대하여 2회 반복 실험을 통해 총 24회 수행하였다. 실험 시작 전 Blower Door와 INNOVA를 활용하여 소형 공동주택 1세대의 기밀성능과 실시간 공기교환율을 측정 및 평가하였으며, 각 단계 실험 중 환경인자로서 실내 공기 중 라돈 농도와 실내 온습도, 외기 온습도 및 차압을 함께 측정하였다.



[그림 4-52] 소형 공동주택을 이용한 실험 프로세스

3.2. 소형 공동주택 개요 및 측정위치 선정

소형 공동주택에서의 필름형 재료 적용 및 현장 측정은 [그림 4-53]과 같이 전용면적 26㎡ 크기의 1개 세대를 대상으로 하였다. 대상 세대는 부엌과 거실이 연결된 스튜디오 타입으로, 시스템 에어컨 등의 냉난방 기기가 설치되지 않은 공가 상태이다. 라돈농도 측정은 「건축자재 라돈 저감관리 지침서(2019)」에 명시된 실내 라돈농도의 연속측정방법에 의거, 측정 시 밀폐를 유지하기 위해 [그림 4-54]와 같이 발코니 환기 루버를 비롯한 누기 발생이 예상되는 부분을 기밀 테이프로 밀봉하였다. [그림 4-55]는 해당 세대의 측정 및 PE 필름 시공 위치를 나타낸다. PE 필름은 공간 내 양측 내력벽(긴벽: 4.7 m × 2.3 m, 짧은벽: 3.6 m × 2.3 m)에 시공하였으며, 욕실과 싱크대에 의해 구분되는 부위는 제외하였다. 측정점 3곳은 벽의 길이와 측정 지점의 균일성을 고려하여, 긴 벽의 양쪽으로부터 1/3 띄어진 지점(Point 1, 2) 및 짧은 벽의 중앙 지점(Point 2)으로 선정하였다.



(a) 대상세대 평면도(26㎡)



(b) 세대 전경

[그림 4-53] 대상 소형 공동주택



[그림 4-54] 측정 세대 밀폐 환경 구축



(a) 측정 지점



(b) 시공 위치(짧은벽)



(c) 시공 위치(긴벽)

[그림 4-55] PE필름 시공 및 측정위치

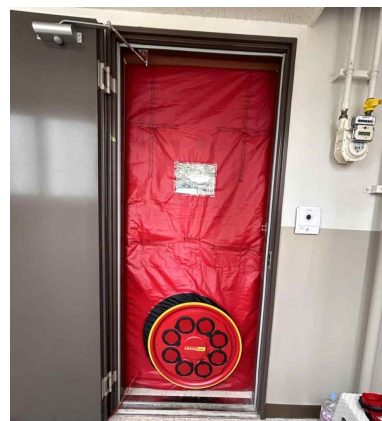
3.3. 소형 공동주택 실험환경 분석

■ 가·감압법을 이용한 소형 공동주택 기밀성능 측정

소형 공동주택의 공기 중 라돈 농도와 표면 라돈 방출량은 측정 세대의 기밀 성능에 따라 달라질 수 있으므로 측정 결과의 균일성 및 해석을 위해서는 측정 세대의 기밀 성능 파악이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 [그림 4-56]과 같이 ISO 9972를 기반으로 Blower Door(Retrotec EU6101)를 활용하여 실내 가압, 감압을 통해 기밀도를 측정하였으며, 측정 결과는 [표 4-6]과 같다. 측정은 5회 수행하였으며, 전체 횟수의 평균값을 사용하였다. 소형 공동주택 측정 세대의 시간당 체적 유량은 50Pa 기준으로 101.31 m³/h로, ACH50 기준 1.51로 평가되었다. 또한, 4Pa 기준 유효 누기 면적은 18.33 cm²으로 측정되었다.



(a) 내부



(b) 외부

[그림 4-56] Blower Door를 이용한 소형공동주택 기밀성능 측정

[표 4-6] 가·감압법에 의한 소형공동주택 기밀성능 측정 결과

구분	1회	2회	3회	4회	5회	평균
Q50 [m ³ /h]	96.36	95.36	97.77	93.50	123.57	101.31
Q4 [m ³ /h]	17.15	18.08	16.72	18.80	14.44	32.39
ACH50 [h ⁻¹]	1.43	1.42	1.45	1.39	1.84	1.51
ELA4 [cm ²]	18.45	19.45	18.00	20.22	15.54	18.33
ELA10 [cm ²]	35.78	36.87	35.39	37.52	35.10	36.13

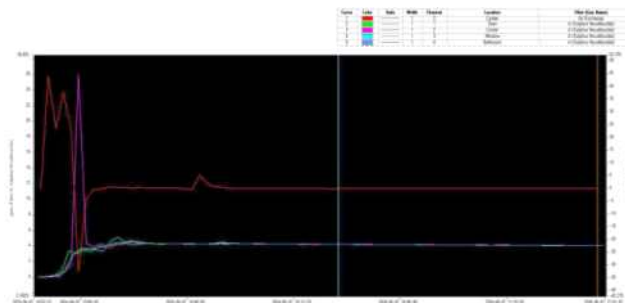
■ 추적가스법을 이용한 소형 공동주택 기밀성능 측정

블로우도어를 활용한 기밀도 측정은 팬을 활용한 인위적인 기압 및 감압 과정을 통해 50Pa 조건 하에서 수행되어 실제 자연환경에서의 공기 교환율과 차이가 발생될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 Mock-up 실험에서와 동일하게 [그림 4-58]과 같이 INNOVA(INNOVA 1512 & 1403)를 활용하여 실시간 공기 교환율을 측정하였다. INNOVA를 활용한 측정은 ASTM E741-23을 기반으로 추적 가스 SF₆를 활용하여 일정 농도 유지법을 통해 수행하였다. 측정 지점은 측정 세대 내 중앙, 전면, 후면, 화장실의 4개로 선정하였으며([그림 4-58] 노란색 원 참조), 중앙에서 SF₆가 4ppm이 유지되도록 주입하였다.



[그림 4-58] INNOVA 실험 (노란색 원은 측정 지점)

[그림 4-59]는 INNOVA를 활용한 실시간 공기 교환율 측정 결과를 나타낸다. 공기 교환율은 추적 가스와 공기 교환율의 데이터 안정성을 고려하여 SF₆를 주입한 시점으로부터 최소 1시간이 지난 이후로부터, 측정 종료로부터 1시간 동안의 평균값을 활용하였다. 측정 결과, 측정 세대의 실시간 공기 교환율은 0.0365 ACH로 분석되었다.



[그림 4-59] 측정 세대 실시간 공기 교환율

■ 소형 공동주택 실내·외 환경 측정

항온항습 조건 유지가 가능하며 실내에 위치하여 외부 환경요인이 적은 Mock-up 챔버와 달리, 소형 공동주택에서의 밀폐 챔버 내 라돈 농도는 실험 과정에서 외기 온습도 및 외부 풍속과 같은 환경인자들에 따라 크게 변동될 수 있다. 특히, 선행 연구에서는 외부 풍속에 의해 변동되는 실내외 차압이 실내 공기 중 라돈 농도와 더불어 표면 라돈 방출량에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 실내 온습도와 외부 기상데이터, 실내외 차압과 같은 환경인자를 필름형 재료의 라돈 표면 방출량 측정 기간과 동시에 측정하였다. [그림 4-60]은 환경인자 측정을 위한 온습도계, weather station 및 차압계를 나타낸다. 온습도계는 측정 지점의 양측 벽 2개소에, weather station과 차압계는 발코니 외부 및 내외부에 설치하였다.



(a) Weather station



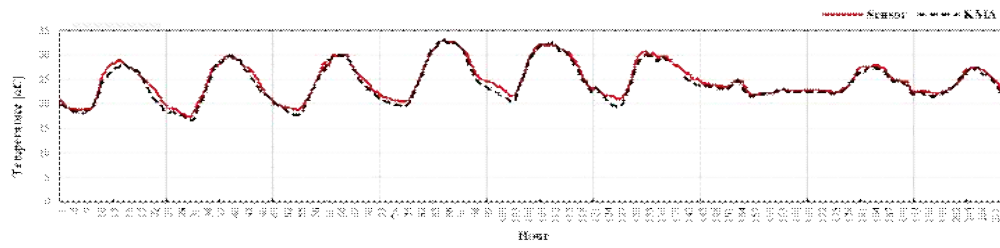
(b) 온습도계



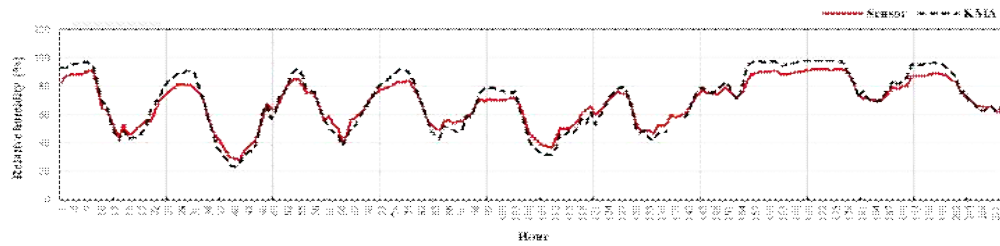
(c) 차압계

[그림 4-60] 실내외 환경 측정

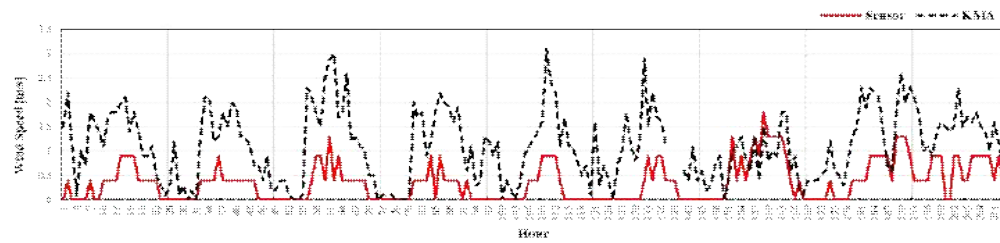
Weather station은 측정 데이터의 신뢰성 확보를 위하여 기상청 기상 자료 개방 포털에서 2024년 6월16일-24일 까지 총 9일간의 측정 세대가 위치한 장소의 기상데이터를 활용하여 [그림 4-61]과 같이 측정값을 검증하였다. [그림 4-61]의 (a)와 (b)에서와 같이 외부 온습도는 기상청 데이터와 유사한 측정값을 나타낸 반면에 (c)와 (d)에서와 같이 외부 풍속과 일사량은 데이터의 분포는 유사하지만 상대적으로 기상청 데이터에 비해 낮은 값을 나타내었다. 이는 weather station이 발코니에 위치하여 윗세대 발코니에 의해 가려지는 부분에 따른 영향과 더불어 weather station의 설치 위치나 지역에 따라 주변 지형의 영향으로 풍속이 국부적으로 달라지기 때문인 것으로 사료된다.



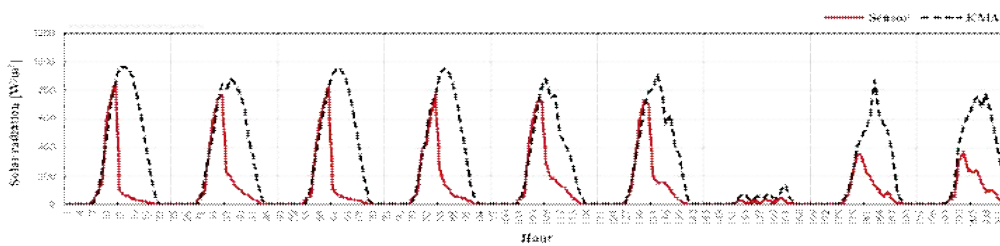
(a) 외기 온도



(b) 외기 습도



(c) 외부 풍속



(d) 외부 일사량

[그림 4-61] Weather station 측정값 검증

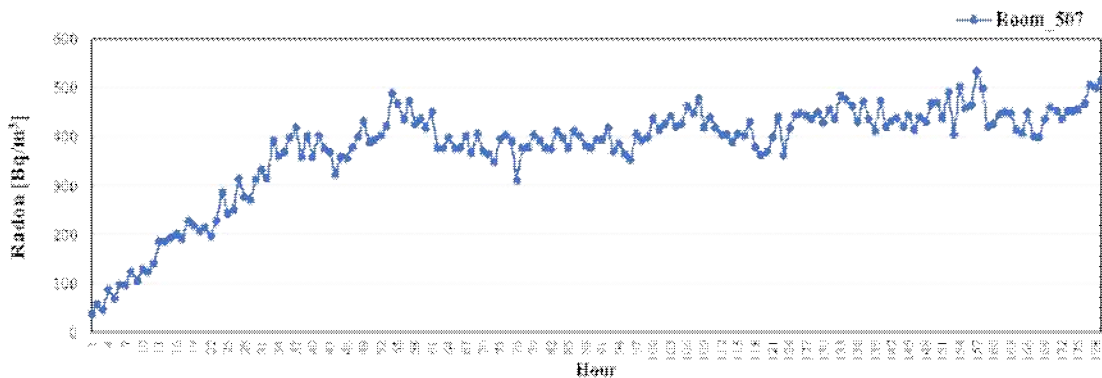
3.4. 소형 공동주택에서의 방사성물질 방출량 측정 결과

■ 기존 벽지 철거 전 표면 방출량 측정 결과(1단계)

측정 세대 기존 벽체의 표면 라돈 방출량은 기존 벽체 표면에 부착한 밀폐 챔버의 공기 교환율 0.076 h^{-1} 을 고려하여 Eq.(3)을 통해 산출하였다. 측정은 데이터의 재현성을 고려하여 2회 반복 실험하였으며, 2회 반복 측정의 최댓값을 활용하였다. [그림 4-62]는 측정 지점 3개소의 밀폐 챔버 부착 모습을, [그림 4-63]은 기존 벽체 표면 라돈 방출량 측정 전 기존 상태에서의 세대 내 공기 중 라돈 농도 측정값을 나타낸다.

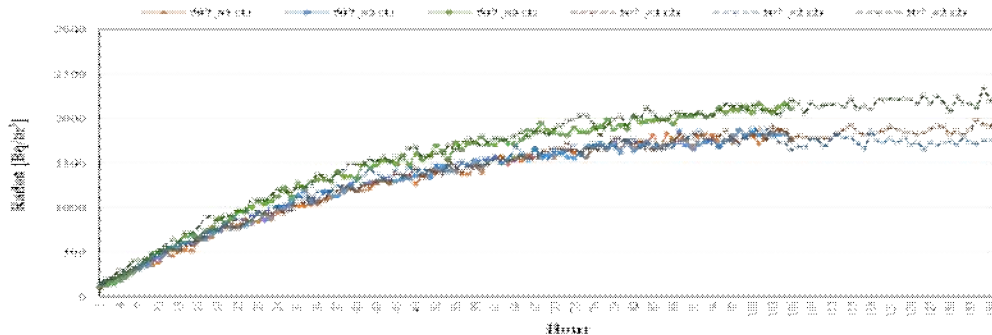


[그림 4-62] 기존 벽체 표면 라돈 방출량 측정

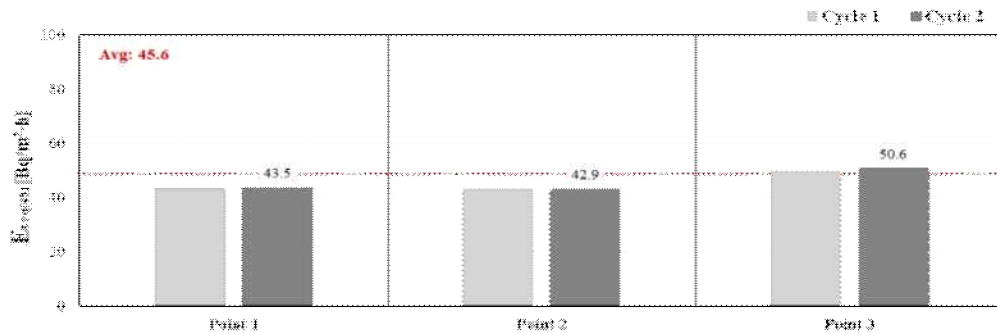


[그림 4-63] 기존 상태에서의 공기 중 라돈 농도 측정값

[그림 4-63]에 나타난 세대 내 실내 공기 중 라돈 농도는 외부환경에 의한 영향의 최소화를 위하여 누기가 발생할 가능성이 존재하는 부위를 모두 기밀 테이프로 밀봉한 것에 따른 세대 내 기밀 성능 향상의 영향을 받았음을 고려하여야 한다. 한편 [그림 4-64]는 측정 지점 3개소에 대한 기존 벽체에서 측정된 밀폐 챔버 내 라돈 농도를 나타낸다. 측정 결과, 3개소의 챔버 내 라돈 농도 $C_{t.eq(72)}$ 은 Point 3(2024 Bq/m³)이 최댓값을 나타내었으며, Point 1(1739 Bq/m³), Point 2(1716 Bq/m³)로 측정되었다. 기존 벽체의 측정 지점 3개소의 챔버 내 평균 라돈 농도는 1826.3 Bq/m³, 표준편차는 146.3 Bq/m³로 8%의 변동률을 나타내었다. [그림 4-65]는 측정 지점 3개소에 대한 기존 벽체의 표면 라돈 방출량 $E_{t.eq(72)}$ 를 나타낸다. 표면 라돈 방출량은 Point 1(43.5 Bq/m²h), Point 2(42.9 Bq/m²h), Point 3 (50.6 Bq/m²h)으로 산출되었다. 실물 크기 벽체 자체의 평균 표면 라돈 방출량은 45.6 Bq/m²h로 분석되었다.



[그림 4-64] 기존 벽체 측정 지점별 밀폐 챔버 내 라돈 농도



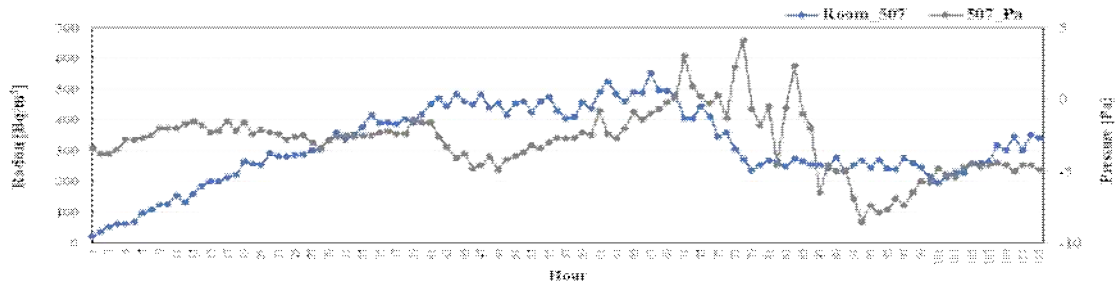
[그림 4-65] 기존 벽체 표면 라돈 방출량 종합

■ 기존 벽지 철거 후 콘크리트 벽체 자체의 표면 방출량 측정 결과(2단계)

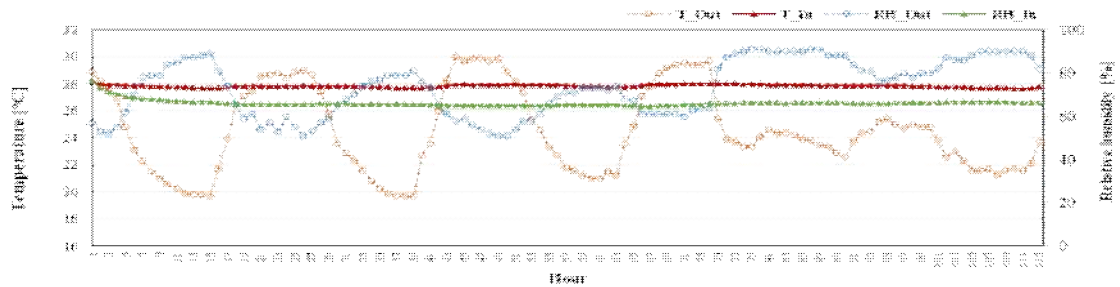
앞선 실험 결과에 따르면, 벽지 시공은 표면 라돈 농도 방출량에 영향을 미치므로 PE 필름 시공에 따른 영향을 객관적으로 분석하기 위하여 측정 세대 벽체의 기존 벽지를 철거한 이후 [그림 4-66]와 같이 표면 라돈 방출량을 측정하였다. 벽지 철거 후 기존 벽체의 표면 라돈 방출량은 벽지 철거 후 벽체 표면에 부착한 밀폐 챔버의 공기 교환율 0.076 h^{-1} 을 고려하여 Eq.(3)을 통해 산출하였다. 측정은 데이터의 재현성을 고려하여 2회 반복 실험하였으며, 2회 반복 측정의 최댓값을 활용하였다. [그림 4-67]과 [그림 4-68]은 벽지 철거 후 측정 회차별 세대 내 공기 중 라돈 농도와 차압, 실내외 온습도 측정값을 나타낸다.



[그림 4-66] 벽지 철거 후 벽체 표면 라돈 방출량 측정

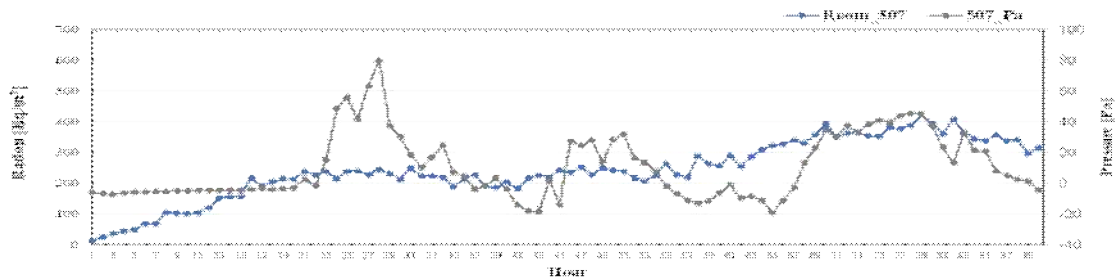


(a) 세대 내 공기 중 라돈 농도 및 차압

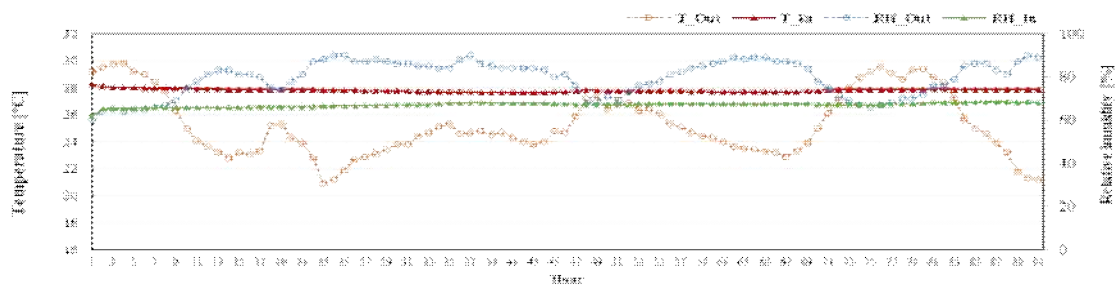


(b) 실내외 온도도

[그림 4-67] 실내 공기 중 농도 및 환경인자 측정값 (1차)



(a) 세대 내 공기 중 라돈 농도 및 차압

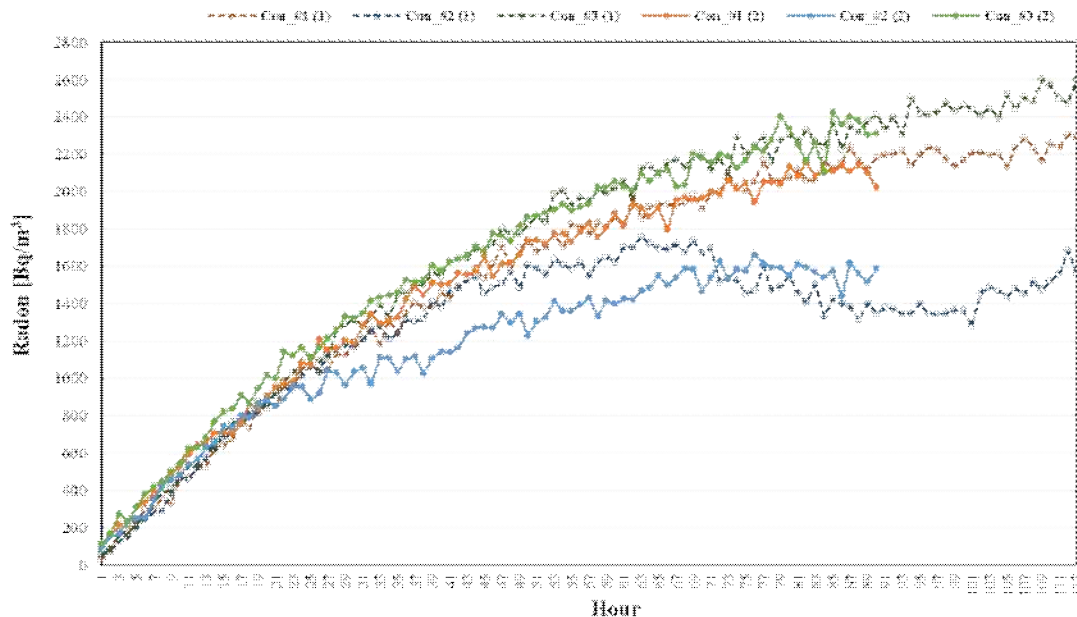


(b) 실내외 온도도

[그림 4-68] 실내 공기 중 농도 및 환경인자 측정값 (2차)

[그림 4-67]과 [그림 4-68]에서 나타난 바와 같이, 세대 내 실내 공기 중 라돈 농도에서 1회차 실내 공기 중 라돈 농도는 측정 70시간 이후 발생된 차압으로 인한 라돈 농도의 급격한 하락으로 인해 48h를 평형 시간 기준으로 하였다. 평균 차압은 1차 - 2.9 Pa로 분석되었다. 모든 차수에서 외부 풍속에 따라 차압이 발생하게 되면 실내 공기 교환을 상승으로 인해 실내 라돈 농도의 감소 추세를 나타내었다. 특히, 2회차 차압의 경우에는 강수의 차압 호스 침투로 인하여 1회차에 비해 현저히 높은 분포를 나타내었다. 온습도의 경우, 기상 조건에 따라 일간 변동이 큰 외기에 비해 실내는 건구온도 평균 27.9 °C, 상대습도 평균 66%로 측정 기간 동안 일정한 온습도 분포를 나타내었다.

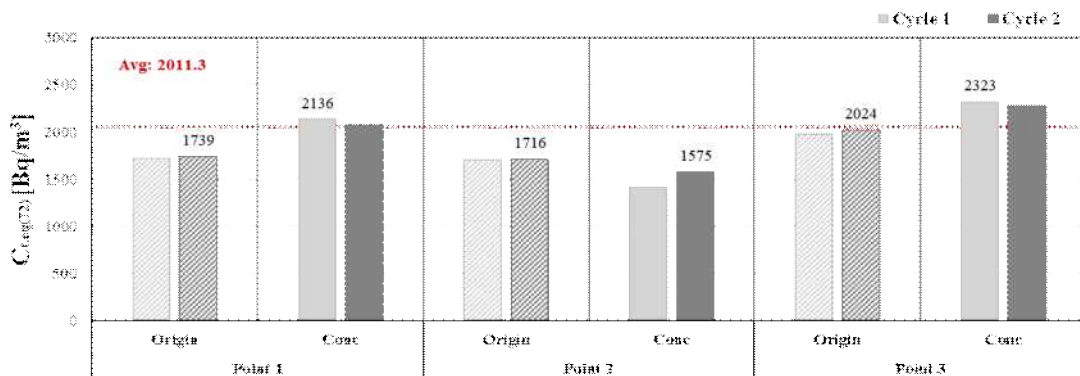
[그림 4-69]는 측정 지점 3개소에 대한 벽지 철거 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도의 시계열 데이터를 나타내며, 벽지 철거 전후에 따른 측정 지점 3개소의 밀폐 챔버 내 라돈 농도 $C_{t,eq(72)}$ 은 [그림 4-70]에 종합적으로 제시하였다.



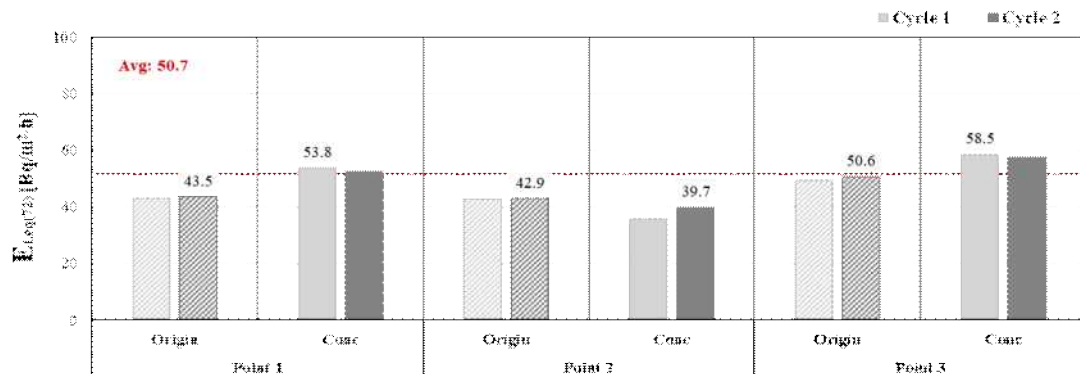
[그림 4-69] 벽지 철거 후 측정 지점별 밀폐 챔버 내 라돈 농도

측정 결과, [그림 4-69] 및 [그림 4-70]과 같이 3개소의 밀폐 챔버 내 라돈 농도

$C_{t.eq(72)}$ 은 Point 3(2323 Bq/m³)이 최댓값을 나타내었으며, Point 1(2136 Bq/m³), Point 2(1419 Bq/m³)로 측정되었다. 벽지 철거 후 벽체의 측정 지점 3개소의 밀폐 챔버 내 평균 라돈 농도는 2011.3 Bq/m³을 나타내었으며, 표준편차는 379 Bq/m³로 19%의 변동률을 나타내었다. 또한, Point 2와 달리 Point 1과 3의 벽지 철거 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도는 철거 전에 비해 각각 22.8%, 14.8%의 증가율을 보이는 것으로 분석되었다. [그림 4-71]은 측정 지점 3개소에 대한 벽지 철거 전후에 따른 기존 벽체의 표면 라돈 방출량 $E_{t.eq(72)}$ 를 나타낸다. 표면 라돈 방출량은 Point 1(53.8 Bq/m²·h), Point 2(39.7 Bq/m²·h), Point 3 (58.5 Bq/m²·h)으로 산출되었다. 벽지 철거 후 벽체의 평균 표면 라돈 방출량은 50.7 Bq/m²·h로 산출되었으며, 벽지 철거 전에 비해 Point 1과 3에서 각각 23.7%와 15.6%의 증가율을 보이는 것으로 분석되었다.



[그림 4-70] 벽지 철거 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도 종합



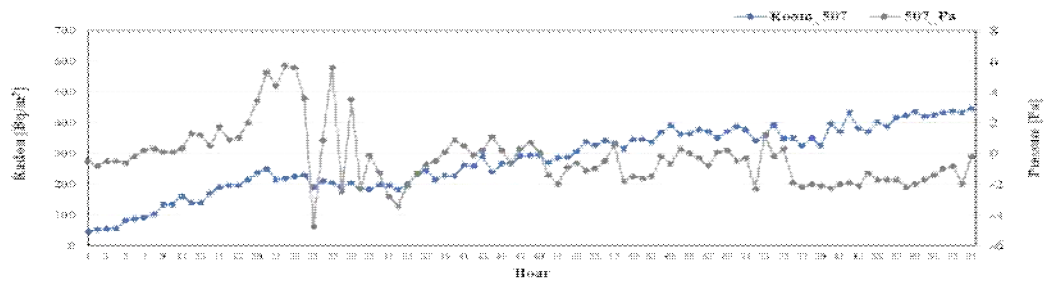
[그림 4-71] 벽지 철거 후 표면 라돈 방출량 종합

■ 필름형 재료 시공 후 표면 방출량 측정 결과(3단계)

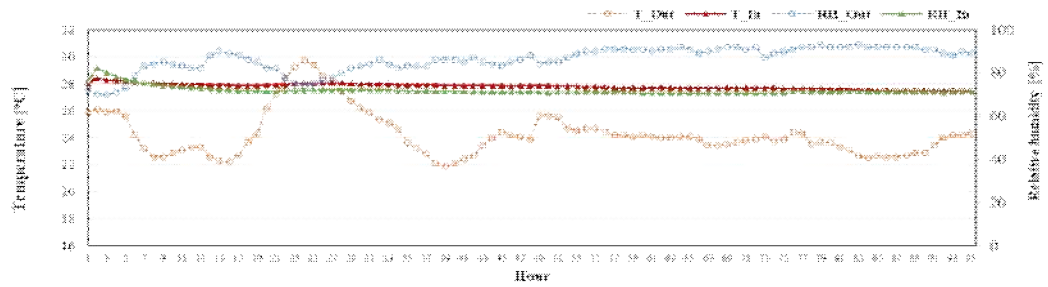
기존 벽지가 철거된 측정 세대 벽체에 대하여 필름형 재료 시공은 PE 필름을 활용하여 [그림 4-72]와 같이 수행하였다. PE 필름은 Mock-up과 동일하게 봉투 붙임 방식으로 벽체에 PE의 가장자리만 실리콘과 실리콘 테이프를 활용하여 부착하였다. 또한, 실제 시공과 동일하게 콘센트 부위는 시공면에서 제외하였다. 측정 세대 벽체에 PE 필름 시공 후 표면 라돈 방출량은 PE 필름이 시공된 벽체 표면에 부착한 밀폐 챔버의 공기 교환율 0.005 h^{-1} 을 고려하여 Eq.(3)을 통해 산출하였다. 밀폐 챔버의 기밀도는 PE 필름에 의해 기존 벽지가 철거된 벽체 표면에 부착한 밀폐 챔버의 기밀도에 비해 현저히 높게 향상되었다. 측정은 데이터의 재현성을 고려하여 2회 반복 실험하였으며, 2회 반복 측정의 최댓값을 활용하였다. [그림 4-73]과 [그림 4-74]는 벽지 철거 후 측정 회차별 세대 내 공기 중 라돈 농도와 차압, 실내외 온습도 측정값을 나타낸다.



[그림 4-72] PE 필름 시공 후 벽체 표면 라돈 방출량 측정

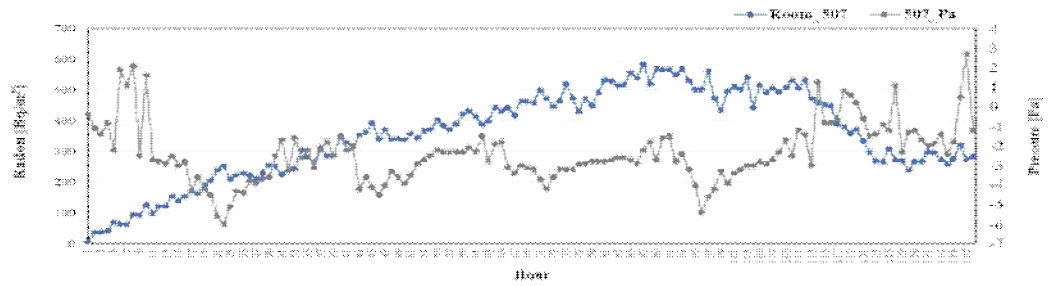


(a) 세대 내 공기 중 라돈 농도 및 차압

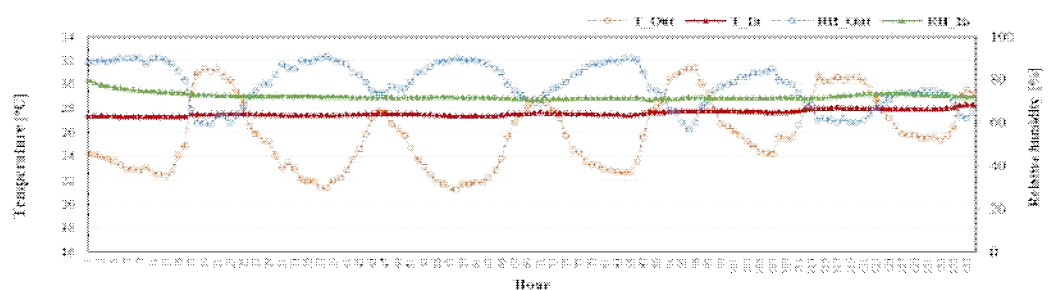


(b) 실내외 온도

[그림 4-73] 실내 공기 중 농도 및 환경인자 측정값 (1차)



(a) 세대 내 공기 중 라돈 농도 및 차압

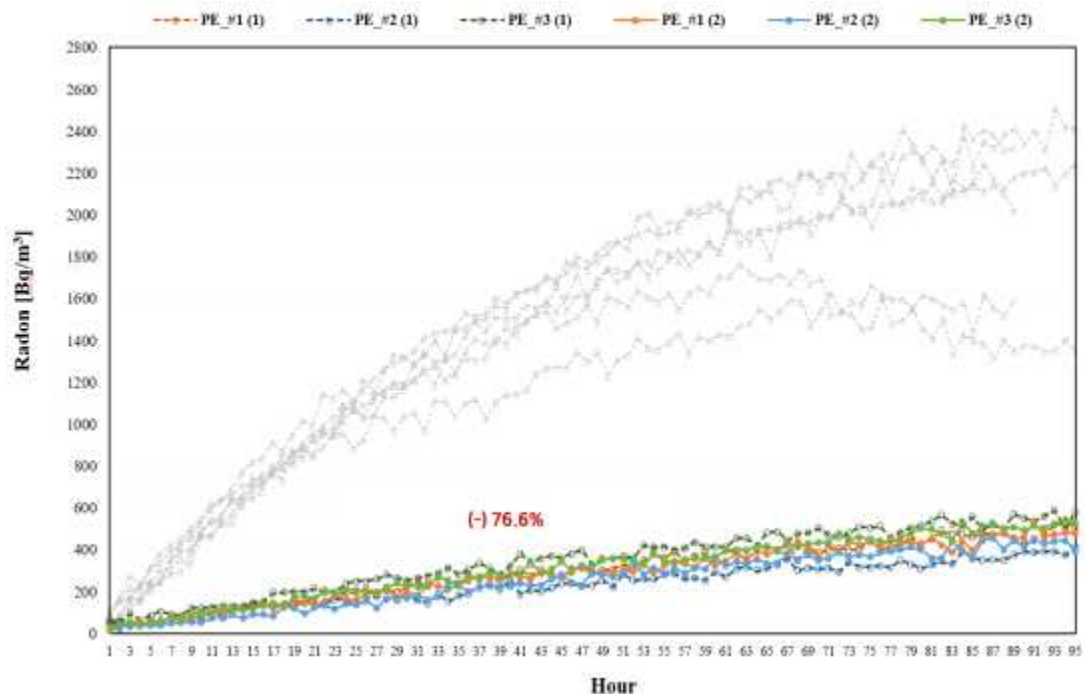


(b) 실내외 온도

[그림 4-74] 실내 공기 중 농도 및 환경인자 측정값 (2차)

[그림 4-73]과 [그림 4-74]에서 나타난 바와 같이, 측정기간 동안 평균 차압은 1차 -0.3 Pa, 2차 -2.4 Pa로 분석되었다. 앞선 결과와 동일하게, 모든 차수에서 외부 풍속 및 차압으로 인한 실내 공기 교환율 상승으로 인해 실내 라돈 농도의 감소 추세를 나타내었다. 온습도의 경우, 기상 조건에 따라 일간 변동이 큰 외기에 비해 실내는 건구온도 평균 27.8 °C, 상대습도 평균 72%로 측정 기간동안 일정한 온습도 분포를 나타내었다.

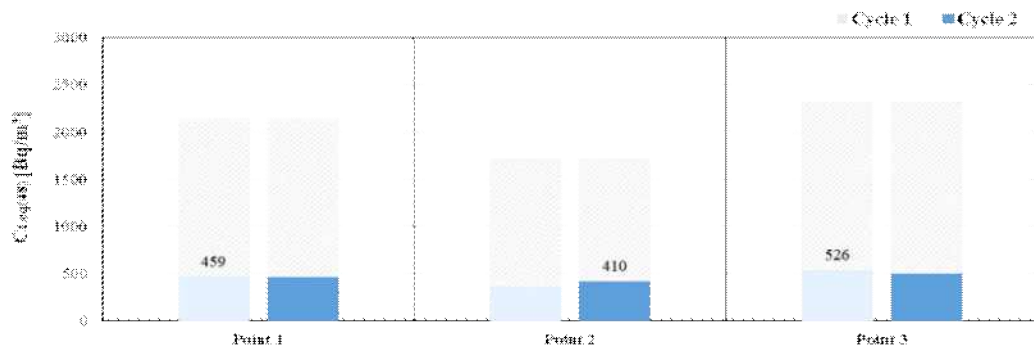
[그림 4-75]은 측정 지점 3개소에 대한 PE 필름 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도의 시계열 데이터를 나타내며, PE 필름 시공에 따른 측정 지점 3개소의 밀폐 챔버 내 라돈 농도 $C_{t,eq(72)}$ 은 [그림 4-76]에 종합적으로 제시하였다. [그림 4-75]에서 회색 그래프는 벽지 철거 후 벽체 밀폐 챔버 내 라돈 농도를 나타낸다. 밀폐 챔버 내 라돈 방출 저감률은 벽지 철거 이후 벽체의 밀폐 챔버 내 라돈 농도 가운데 최댓값을 기준으로 산출하였다.



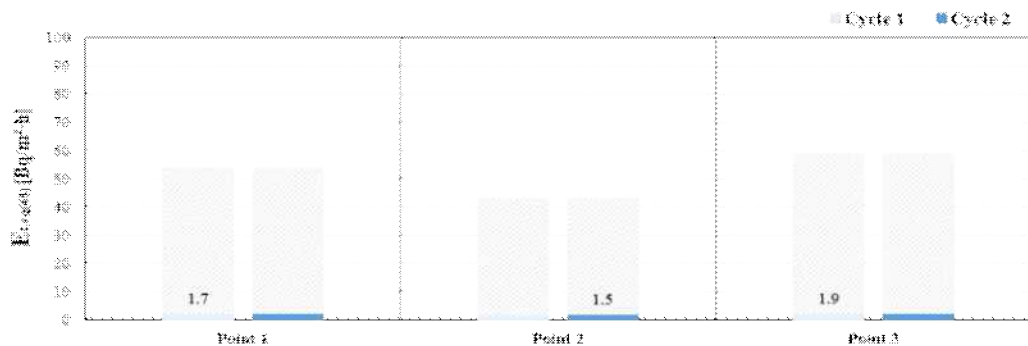
[그림 4-75] PE 필름 시공 후 측정 지점별 밀폐 챔버 내 라돈 농도

측정 결과, [그림 4-75] 및 [그림 4-76]과 같이 3개소의 밀폐 챔버 내 라돈 농도

$C_{t.eq(72)}$ 은 Point 3(526 Bq/m^3)이 최댓값을 나타내었으며, Point 1(459 Bq/m^3), Point 2(410 Bq/m^3)로 측정되었다. 밀폐 챔버 내 라돈 방출 저감률은 Point 1이 78.5%로 최댓값을 나타내었으며, Point 2가 76.1%, Point 3이 77.4%로 분석되었다. PE 필름 시공에 따른 측정 지점 3개소 밀폐 챔버 내 평균 라돈 농도는 465 Bq/m^3 , 표준편차는 61 Bq/m^3 로 13.1%의 변동률을 나타내었으며, 77.3%의 평균 라돈 방출 저감률을 나타내는 것으로 분석되었다. [그림 4-77]은 측정 지점 3개소에 대한 PE 필름 시공 후 표면 라돈 방출량 $E_{t.eq(72)}$ 를 나타낸다. 표면 라돈 방출량은 Point 1이 $1.7 \text{ Bq/m}^2\text{h}$ 로 96.8%, Point 2가 $1.5 \text{ Bq/m}^2\text{h}$ 로 96.5%, Point 3이 $1.9 \text{ Bq/m}^2\text{h}$ 로 96.8% 저감된 것으로 산출되었다. 평균 표면 라돈 방출량은 $1.7 \text{ Bq/m}^2\text{h}$ 로 산출되었으며, 평균 96.7% 저감된 것으로 분석되었다.



[그림 4-76] PE 필름 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도 종합



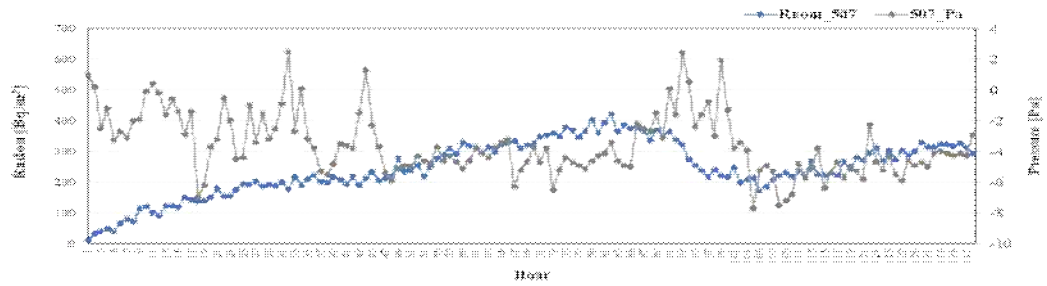
[그림 4-77] PE 필름 시공 후 표면 라돈 방출량 종합

■ 벽지 시공 후 표면 방출량 측정 결과(4단계)

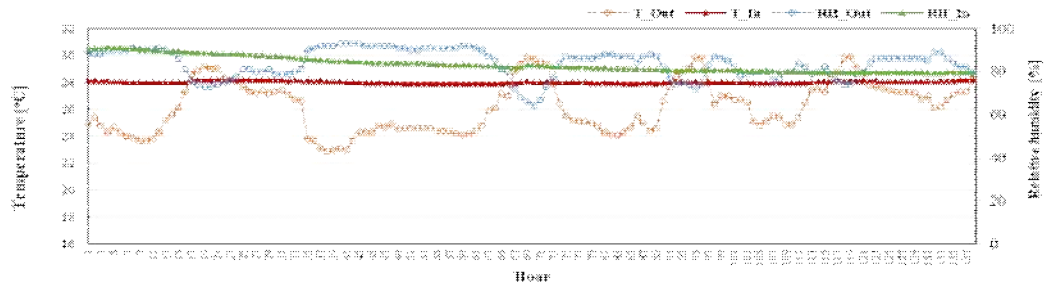
PE 필름이 시공된 측정 세대 벽체에 대하여 벽지 시공은 [그림 4-78]과 같이 수행하였다. 벽지는 앞선 Mock-up 실험과 동일하게 봉투 붙임 방식으로 시공하였다. 따라서, 벽지는 벽체에 모든 면이 완벽하게 밀착되지 않고 가장자리를 제외한 면은 벽체에서 떠 있는 형태로 유지된다. 또한, 실제 시공과 동일하게 콘센트 부위는 시공면에서 제외하였다. 측정 세대 벽체에 PE 필름 및 벽지 시공 후 표면 라돈 방출량은 벽지 시공 후 벽체 표면에 부착한 밀폐 챔버의 공기 교환율 0.031 h^{-1} 을 고려하여 Eq.(3)을 통해 산출하였다. 밀폐 챔버의 기밀도는 종이 재질의 벽지 부착에 의해 실물 벽체 자체 표면에 부착한 밀폐 챔버의 기밀도에 비해서는 향상되었으나, PE 필름만 시공한 경우에 비해서는 크게 감소하였다. 측정은 데이터의 재현성을 고려하여 2회 반복 실험하였으며, 2회 반복 측정의 최댓값을 활용하였다. [그림 4-79]와 [그림 4-80]은 벽지 철거 후 측정 화차별 세대 내 공기 중 라돈 농도와 차압, 실내외 온습도 측정값을 나타낸다.



[그림 4-78] PE 필름 및 벽지 시공 후 벽체 표면 라돈 방출량 측정

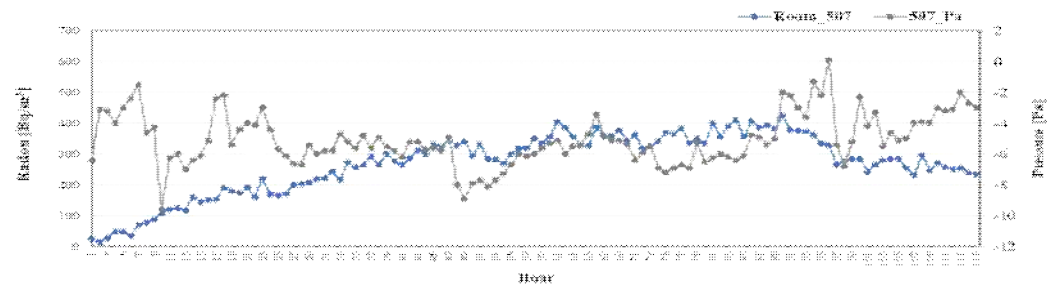


(a) 세대 내 공기 중 라돈 농도 및 차압

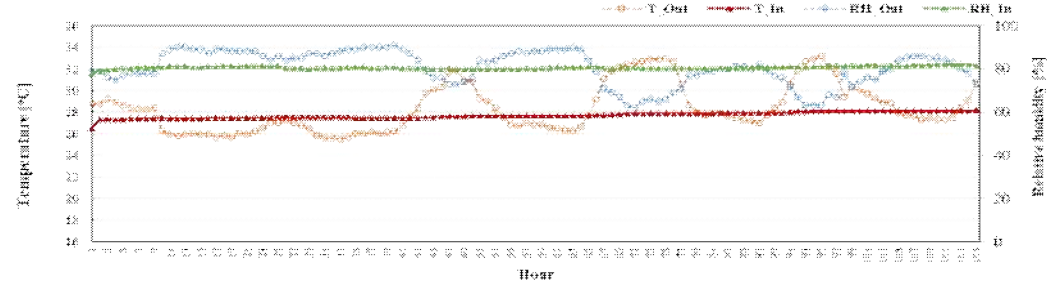


(b) 실내외 온습도

[그림 4-79] 실내 공기 중 농도 및 환경인자 측정값 (1차)



(a) 세대 내 공기 중 라돈 농도 및 차압

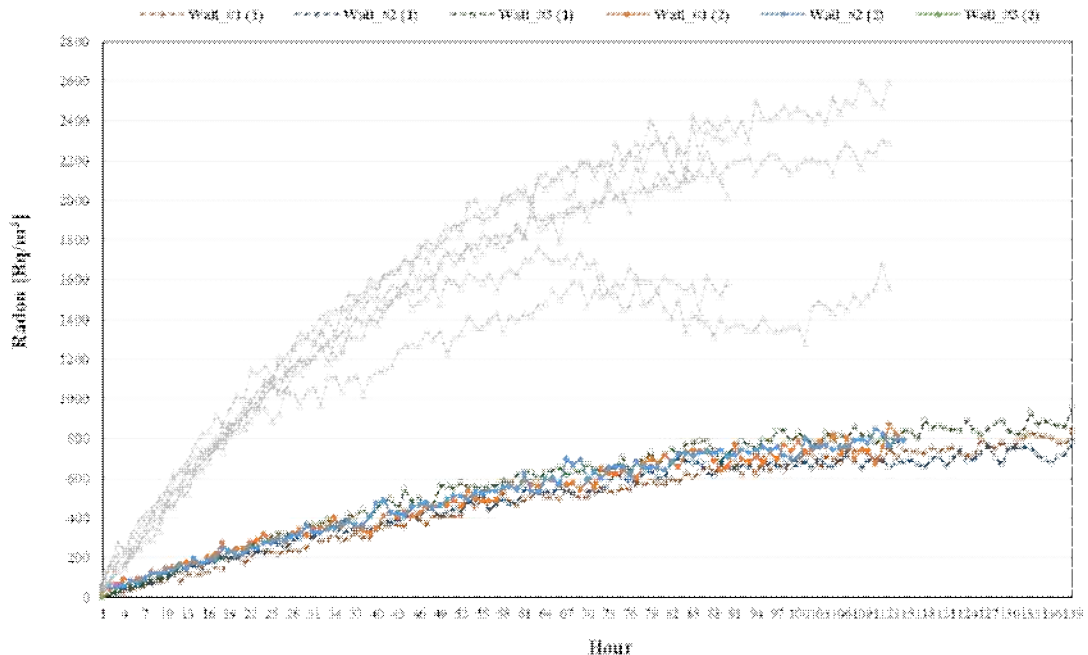


(b) 실내외 온습도

[그림 4-80] 실내 공기 중 농도 및 환경인자 측정값 (2차)

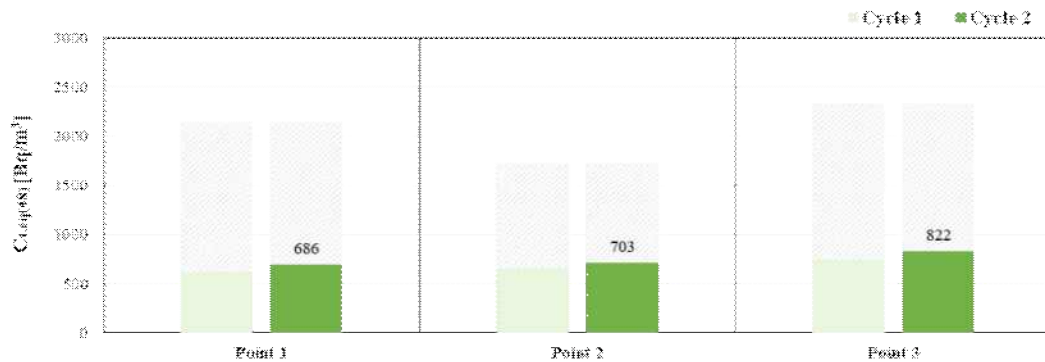
[그림 4-79]와 [그림 4-80]에서 나타난 바와 같이 측정기간 동안의 평균 차압은 1차 -3.6 Pa, 2차 -5.1 Pa로 분석되었다. 앞선 결과와 동일하게, 모든 차수에서 외부 풍속 및 차압으로 인한 실내 공기 교환율 상승으로 인해 실내 라돈 농도의 감소 추세를 나타내었다. 온습도의 경우, 기상 조건에 따라 일간 변동이 큰 외기에 비해 실내는 건구온도 평균 28 oC, 상대습도 평균 83%로 측정 기간동안 일정한 온습도 분포를 나타내었다.

[그림 4-81]은 측정 지점 3개소에 대한 PE 필름 및 벽지 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도의 시계열 데이터를 나타내며, 벽지 시공 후에 따른 측정 지점 3개소의 밀폐 챔버 내 라돈 농도 $C_{t,eq(72)}$ 은 [그림 4-82]에 종합적으로 제시하였다. [그림 4-81]에서 회색 그래프는 벽지 철거 후 벽체 밀폐 챔버 내 라돈 농도를 나타내며, 그래프의 범례에서 Wall은 wallpaper를 의미한다. 밀폐 챔버 내 라돈 농도 저감률은 벽지 철거 이후 벽체의 밀폐 챔버 내 라돈 농도 가운데 최댓값을 기준으로 산출하였다.

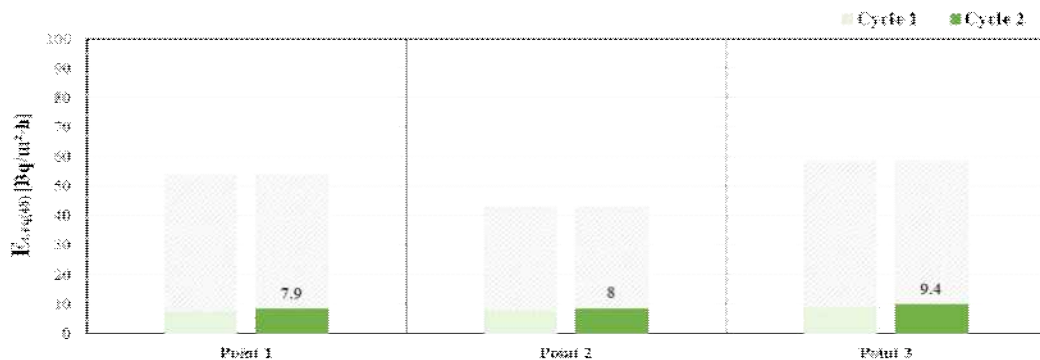


[그림 4-81] PE 필름 및 벽지 시공 후 측정 지점별 밀폐 챔버 내 라돈 농도

측정 결과, [그림 4-81] 및 [그림 4-82]과 같이 3개소의 밀폐 챔버 내 라돈 농도 $C_{t.eq(72)}$ 은 Point 3(822 Bq/m³)이 최댓값을 나타내었으며, Point 1(686 Bq/m³), Point 2(703 Bq/m³)로 측정되었다. 밀폐 챔버 내 라돈 방출 저감률은 Point 1이 67.9%로 최댓값을 나타내었으며, Point 2가 59%, Point 3이 64.6%로 분석되었다. PE 필름 및 벽지 시공에 따른 측정 지점 3개소의 밀폐 챔버 내 평균 라돈 농도는 737 Bq/m³, 표준편차는 72.5 Bq/m³로 9.8%의 변동률을 나타내었으며, 평균 63.8%의 라돈 방출 저감률을 나타내는 것으로 분석되었다. [그림 4-83]은 측정 지점 3개소에 대한 PE 필름 및 벽지 시공 후 표면 라돈 방출량 $E_{t.eq(72)}$ 를 나타낸다. 표면 라돈 방출량은 Point 1이 7.9 Bq/m²·h로 85.3%, Point 2가 8 Bq/m²·h로 81.4%, Point 3이 9.4 Bq/m²·h로 83.9% 저감된 것으로 산출되었다. 평균 표면 라돈 방출량은 8.4 Bq/m²·h로 산출되었으며, 평균 83.5% 저감된 것으로 분석되었다.



[그림 4-82] PE 필름 및 벽지 시공 후 밀폐 챔버 내 라돈 농도 종합



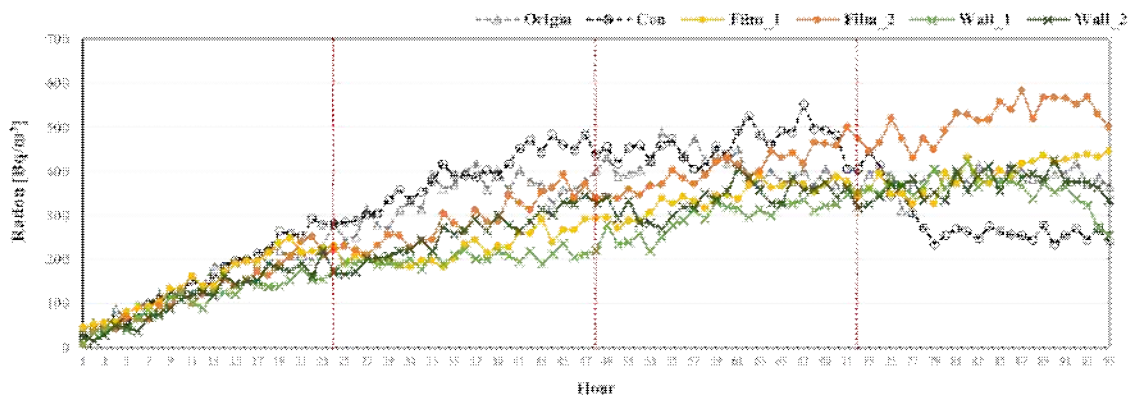
[그림 4-83] PE 필름 및 벽지 시공 후 표면 라돈 방출량 종합

■ 소형 공동주택에서 필름형 재료의 라돈 방출 측정 결과 종합

[표 4-7]은 (1) 기존 벽지가 부착된 기존 벽체, (2) 기존 벽체의 벽지 철거 후, (3) 실내 벽체 위 필름형 재료 시공 후, (4) 실내 벽체 위 필름 및 벽지 시공 후의 4단계에 대한 밀폐 챔버 내 라돈농도 $C_{t.eq(72)}$ 과 표면 라돈 방출량 $E_{t.eq(72)}$ 측정 결과를 나타낸다. 소형 공동주택 벽체에 PE 필름만 시공한 경우 평균 라돈 방출 저감률은 $C_{t.eq(72)}$ 에서 78%, $E_{t.eq(72)}$ 에서 97%로 분석되었으며, 벽지를 함께 시공한 경우 평균 저감률은 $C_{t.eq(72)}$ 에서 64%, $E_{t.eq(72)}$ 에서 84%로 PE 필름만 부착하는 경우에 비해 감소되는 양상을 나타내었다. 이는 앞선 실험들에서와 유사하게 벽지 부착을 위해 활용된 접착용 풀에 따른 벽지의 흡윤으로 인한 영향 때문인 것으로 사료된다.

[표 4-7] 소형 공동주택 활용 필름형 재료의 라돈 방출 측정 결과 종합

지점		밀폐 챔버 공기 교환율 [h ⁻¹]	Point 1		Point 2		Point 3		평균 저감률
			1차	2차	1차	2차	1차	2차	
(1) 기존 벽체 + 벽지	$C_{t.eq(72)}$	0.076	1724	1739	1706	1716	1981	2024	-
	$E_{t.eq(72)}$		43.1	43.5	42.7	42.9	49.5	50.6	
(2) 벽지 철거	$C_{t.eq(72)}$	0.076	2136	2078	1419	1575	2323	2278	
	$E_{t.eq(72)}$		53.8	52.3	35.7	39.7	58.5	57.4	
(3) 벽체 + PE	$C_{t.eq(72)}$	0.005	459	452	354	410	526	494	78%
	저감률		79%		73%		77%		
	$E_{t.eq(72)}$		1.7	1.7	1.3	1.5	1.9	1.8	97%
	저감률		97%		96%		97%		
(4) 벽체 + PE +벽지	$C_{t.eq(72)}$	0.031	615	686	649	703	737	822	64%
	저감률		68%		55%		65%		
	$E_{t.eq(72)}$		7.0	7.9	7.4	8.0	8.4	9.4	84%
	저감률		85%		80%		84%		



[그림 4-84] 단계별 소형 공동주택 세대 내 공기 중 라돈 농도

[표 4-8] 평형 시간 기준 단계별 세대 내 공기 중 라돈 농도

시공 단계	(1) 기존 벽체 + 벽지	(2) 벽지 철거	(3) 벽체 + PE 필름		(4) 벽체 + PE + 벽지	
			1차	2차	1차	2차
$C_{t.eq(24)}$ 저감률	-	(+) 12%	35%	17%	42%	25%
$C_{t.eq(48)}$ 저감률	-	(+) 13%	15%	-	25%	17%
$C_{t.eq(72)}$ 저감률	-	-	-	-	10%	5%

소형 공동주택 벽체에 PE 필름 시공에 따른 세대 내 라돈 농도 저감 효과 분석을 위하여 본 연구에서는 앞선 (1) 기존 벽지가 부착된 기존 벽체, (2) 기존 벽체의 벽지 철거 후, (3) 실내 벽체 위 필름형 재료 시공 후, (4) 실내 벽체 위 필름 및 벽지 시공 후의 4단계에 대해 각 단계별 세대 내 공기 중 라돈 농도 측정값을 분석하였으며, 분석 결과는 [그림 4-84] 및 [표 4-8]과 같다. 앞서 언급한 바와 같이, 세대 내 공기 중 라돈 농도는 차압 발생에 따라 크게 변동함에도 불구하고 대부분의 단계에서 기준 평형 시간의 증가에 따라 증가하는 추세를 나타내었다. 시공 단계에 따라 평형 시간 24시간 기준 세대 내 공기 중 라돈 농도 $C_{t.eq(24)}$ 는 벽지 철거 이후에 12%의 농도 상승을 나타내었으며, PE 필름 시공 후에는 최대 35%, PE 필름 및 벽지 시공 후에

는 최대 42%의 세대 내 공기 중 라돈 농도 저감 효과가 있는 것으로 분석되었다. 이후 평형 시간 48시간 기준 세대 내 공기 중 라돈 농도 $C_{t.eq(48)}$ 는 벽지 철거 후 13%의 상승을 나타내었으며, PE 필름 시공 후에는 최대 15%, PE 필름 및 벽지 시공 후에는 최대 25%의 세대 내 공기 중 라돈 농도 저감 효과가 있는 것으로 분석되었다. 평형 시간 72시간 기준 세대 내 공기 중 라돈 농도 $C_{t.eq(72)}$ 는 PE 필름 및 벽지 시공 후에는 최대 10%의 공기 중 라돈 농도 저감 효과가 있는 것으로 분석되었다. 데이터 분포를 고려하여 24시간 이후로부터의 평균 농도를 기준으로 분석하는 경우에는 단계에 따라 PE 필름 시공 후 15%, PE 필름 및 벽지 시공 후 24% 저감 가능한 것으로 분석되었다. 따라서, PE 필름 활용에 따른 세대 내 공기 중 라돈 농도의 저감 효과는 시공 후 측정 초기에 가장 크게 나타났으며 시간에 따라 점차 감소함을 나타내었다. 이는 세대 내 공기 중 라돈 농도는 차압에 의해 변동과 PE필름이 적용되지 않은 실내 라돈발생원 등에 의해 밀폐된 주거공간에서의 라돈 농도가 증가한 영향일 수 있다. 공정시험법에 의한 실내라돈농도 측정은 밀폐후 5시간 이후 48시간의 평균 값을 기반으로 하고 있어, 공정시험법에 의한 측정시 보다 효과적인 저감효과 확인이 가능할 것으로 판단된다. 또한 객관적인 세대 내 공기 중 라돈 저감 효과 분석을 위해서는 복수의 실험세대를 대상으로 한달 이상의 정밀한 장기 측정을 통한 저감효과 확인이 권장된다.

4. 소결

본 연구과제의 주요 내용은 공동주택의 실내 라돈 저감을 위해 필름형 재료를 적용하고, 라돈 저감효과를 평가하는 것으로 본 장에서 시편에 4종의 필름형 재료를 적용하여 가장 적합한 재료인 PE필름을 선정하였으며, 이를 실물벽체 Mock-up 실험을 통해 실제 벽체와 같은 콘크리트 면에 적용시의 저감성능을 평가하였다. 마지막으로 소형공동주택 현장에 라돈 저감을 위해 가장 우선적으로 적용이 필요한 단열재가 없는 내력벽에 적용하여 적용 전후의 표면 라돈 방출량을 확인하였다. [표 4-9]는 본 연구과제에서 실내 라돈 저감을 위해 선정한 자재인 PE필름에 대해 시편 실험, 실물벽체에서의 Mock-up 실험, 소형공동주택에서의 현장적용 실험시 각각 콘크리트 벽체 자체, 필름형 재료 적용 단계, 벽지까지 최종 적용한 단계²⁴⁾에서의 밀폐 아크릴 챔버 내 라돈 농도 $C_{t,eq(48)}[Bq/m^3]$ 및 표면 라돈 방출량 $E_{t,eq(48)}[Bq/m^2h]$, 콘크리트 벽체 대비 저감률(%)을 비교한 것이다.

[표 4-9] 시편, Mock-up, 현장 실험에서의 필름형 재료 적용에 따른 단계별 밀폐챔버 라돈농도 및 표면 라돈 방출량 비교

실험 구분 측정단계/ 측정값		시편 실험		실물벽체(Mock-up)실험		소형공동주택(현장)	
		$C_{t,eq(48)}$	$E_{t,eq(48)}$	$C_{t,eq(48)}$	$E_{t,eq(48)}$	$C_{t,eq(72)}$	$E_{t,eq(72)}$
콘크리트 벽체	챔버 기밀도	0.1092 h ⁻¹		0.2134 h ⁻¹		0.0764 h ⁻¹	
	농도/방출량	140.2	19.7	1170.5	77.6	2011.3	50.7
PE필름 시공	챔버 기밀도	0.003 h ⁻¹		0.0092 h ⁻¹		0.0047 h ⁻¹	
	농도/방출량	36.8	0.5	405.6	2.0	465.0	1.7
	저감률(%)	73.8%	97.5%	65.4%	97.5%	76.9%	96.7
PE필름 +벽지 시공	챔버 기밀도	0.005 h ⁻¹		0.0206 h ⁻¹		0.0306 h ⁻¹	
	농도/방출량	50.2	0.8	584.0	4.9	737.0	8.4
	저감률(%)	64.2%	96.0%	50.2%	93.7%	63.4%	83.5%

* $C_{t,eq(48)}$ = 48시간 이후(평형도달 시간으로 가정) 24시간 동안의 평균 라돈 방출농도[Bq/m³]

* $E_{t,eq(48)}$ = $C_{t,eq(48)}$ 에 따른 표면 라돈 방출량[Bq/m²h]

24) 시편실험 및 Mock-up 실험의 경우 (1)~(3)단계, 소형공동주택 현장실험의 경우 (2)~(4)단계에 해당

시편과 Mock-up, 소형공동주택 현장에서의 실험 결과를 비교하면, 모두 PE필름을 시공했을 때 콘크리트 표면에서의 라돈 방출률은 큰 차이 없이 96.7~97.5% 저감되었다. 단, 벽지까지 시공했을 경우 벽지 시공후 충분한 건조기간 없이 측정하여 벽지의 습윤 상태에 따라 PE 필름 시공시보다 저감률이 다소 낮아진 것으로 판단된다. 그러나 소형공동주택 현장에서 벽지까지 시공한 단계에서의 표면 라돈 방출량의 저감률이 83.5 %로 시편, 실물벽체에서의 저감률(96.0 %, 93.7 %)보다 뚜렷하게 낮아졌는데 우선 PE필름만 시공한 경우 챔버의 기밀도와 벽지까지 시공한 경우 챔버의 기밀도가 7배 정도의 차이를 보이고 있으며, 이는 측정기간동안 상대습도가 시편 실험장소에서 42 ~ 65 %RH, 실물벽체 Mock-up 실험을 수행한 외단열 챔버에서는 50 %RH를 유지한 반면, 소형공동주택 현장의 경우 한여름철 실외 80 %RH 이상, 실내 66 %RH의 환경에서 측정하여 챔버 내부의 벽체와 벽지의 습윤상태에도 영향을 주었을 것으로 판단된다. 건축자재의 함습량은 라돈 방출에 영향을 미치는 주요 인자로 규명되었으며, 이병희 외(2022)의 연구²⁵⁾에서도 콘크리트 시편에서의 함습량 변화를 확인하여 벽체의 함습량이 표면 방출률에 영향을 미칠 수 있음을 시사한 바 있다. [표 4-10]은 PE필름을 시공한 소형공동주택에서 시공 및 실험 이후 3개월간 PE필름이 시공된 벽체 표면에 아크릴 챔버 2개를 부착하여 밀폐형 챔버를 이용한 라돈 농도 측정 및 표면에서의 라돈 방출량을 도출한 것이다. 이때, 챔버의 누기율은 동일하다고 가정하였으며 고온다습한 여름철의 측정값보다는 상대적으로 건조한 가을철 측정 결과에서 상대적으로 표면라돈 방출량의 감소로 결과적으로 저감률이 5% 증가하였다. 다만 벽체의 습윤상태가 영향을 미친 것으로 판단하기 위해서는 장기간에 걸친 계절별 측정과, 벽체의 함습량, 챔버내 상대습도 측정 등 표면 라돈 농도와 측정값에 영향을 줄 수 있는 요인을 규명하기 위한 추가 측정을 통해 밝혀야 한다.

[표 4-10] PE필름 시공 이후 3개월간 시공면에서의 표면 라돈 방출량 측정 결과

	시공단계 측정		1차 측정(8/16~)		2차 측정(9/13~)		3차 측정(10/17~)	
	$C_{t,eq(72)}$	$E_{t,eq(72)}$	$C_{t,eq(72)}$	$E_{t,eq(72)}$	$C_{t,eq(72)}$	$E_{t,eq(72)}$	$C_{t,eq(72)}$	$E_{t,eq(72)}$
농도 /방출량	737	8.4	600	6.9	630.8	7.2	500.5	5.7
저감률 (%)	63.40%	83.50%	70.17%	86.39%	68.64%	85.80%	75.12%	88.76%

* $C_{t,eq(72)}$ = 72시간 이후(평형도달 시간으로 가정) 24시간 동안의 평균 라돈 방출농도[Bq/m]

* $E_{t,eq(72)}$ = $C_{t,eq(72)}$ 에 따른 표면 라돈 방출량[Bq/mh]

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

제5장 결론

1. 필름형 재료를 이용한 실내 라돈 관리 방안 고찰

국회와 환경부에서 신축 공동주택을 대상으로 조사한 자료에 따르면 2021년 2531가구 중에서는 399가구(15.7%)가, 2022년 1,925가구 중에서는 145 가구(7.5%)가 실내 라돈 농도 권고 기준 148 Bq/m^3 을 초과하고 있었다. 한편 겨울철 공동주택 1,957세대를 대상으로 한 다른 조사에서는, 3.5%의 세대가 기준치를 초과하고 있었으며 기준치 초과세대의 대부분(82%)은 200 Bq/m^3 이하로 나타났고 최대 농도는 338 Bq/m^3 이었다.

본 연구에서는 소형 공동주택 1세대를 대상으로 라돈 저감을 위한 필름형 재료인 PE 필름을 선정하고 소형 공동주택의 천장, 바닥 등을 포함한 콘크리트 구조체 전체가 아닌 측벽(내력벽) 2개소에 대해서만 시공하였으며, 이때 PE 필름 시공 면적은 19.1m^2 으로 전체 콘크리트 구조체 내측 표면적 74.77m^2 대비 25%에 해당한다. 측정실험 결과, 필름 시공면에서의 표면 라돈 방출량은 84% 저감이 가능하고, 실내 라돈농도는 27% 정도 저감되는 것으로 나타났다. 이때 실내 라돈농도는 측정 개시 후 5일이 지난 120시간 시점 이후의 24시간 평균 농도를 기반으로 비교한 것임을 밝힌다.

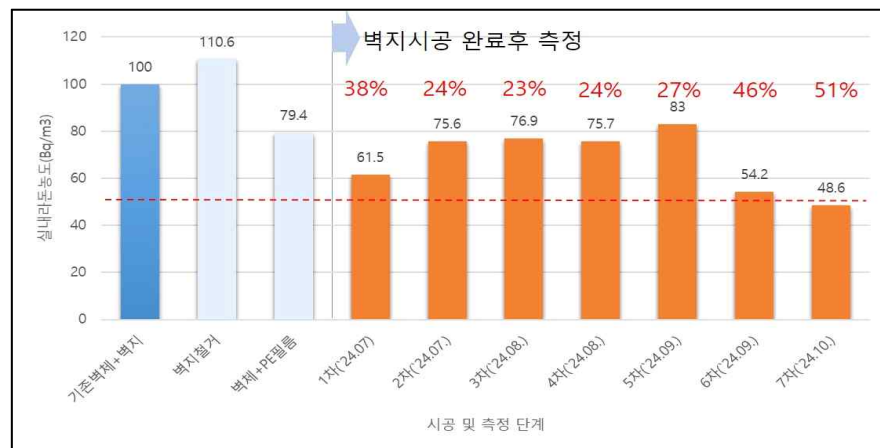
본 연구의 최종 목적은 콘크리트 등 라돈 발생원으로부터의 실내 유입을 막기 위해 필름형 재료를 이용하여 권고기준치인 148 Bq/m^3 이하가 되도록 실내 라돈 농도를 유지할 수 있는 관리방안을 제시하는 것이다. 따라서 본 연구과제에서 실내 라돈 농도를 저감하기 위한 필름형 재료인 PE필름을 시공한 전 후의 실내공기질 공정시험방법에 의해 측정한 값을 비교할 필요가 있다. 또한, 라돈 방출에 영향을 미치는 습도가 높은 한여름에 측정이 이루어진 점을 감안, 이후 3개월간의 실내 라돈농도를 실내공기질 공정시험방법에 의해 추가 측정을 실시하였다. 즉, 30분 환기 → 5시간 밀폐 → 48시간 측정(밀폐상태)의 순서에 따라 측정한 실내라돈농도이다. [표 5-1] 및 [그림 5-1]은 실험전 세대에 기존 벽지가 시공된 상태에서 측정결과([표 5-1]의 (1))를 벽지 철거 후([표 5-1]의 (2)), 벽체에 PE필름을 시공한 이후([표 5-1]의 (3)) 그리고 PE필름 위에 벽지까지 재시공한 이후 저감 시공이 모두 완료된

상태([표 5-1]의 (4))에서 실내라돈 농도를 측정한 결과를 비교한 내용이다. 이때, 저감률은 벽지 철거전 기존 벽지가 시공되어있는 상태([표 5-1]의 (1))에서 비교하여 필름형 재료의 저감 시공에 따른 효과를 판단하고자 하였다. 이때, 시공 및 측정단계에 따른 상대비교를 위해 실내라돈 농도값은 백분위 값으로 표현하였다.

측정결과, 기존 벽지가 시공된 상태의 실내라돈농도를 100.0으로 가정할 때, 이후 벽지 철거에 따라 콘크리트 면이 직접 노출됨에 따라 실내 라돈농도는 약 10.6% 증가하였으며,, 라돈 저감을 위한 필름형 재료인 PE필름을 시공함에 따라 실내라돈농도는 기존 벽지시공 상태 대비 약 20.6% 저감되었다. 이후 PE필름 위에 최종 실내 마감을 위해 벽지까지 재시공(24.07.15.)하였으며 이후에도 실내 라돈농도를 측정 한 결과, 여름철 고온다습한 계절에 측정(1~5차)시 저감률은 약 23.1~38.5% 수준으로 나타나고 있었으나 계절이 변화함에 따라 7차 측정시에는 약 51.4% 저감된 실내라돈 농도를 나타내고 있었다.

[표 5-1] 시공 및 측정단계별 실내 라돈농도 측정 결과

구분	시공 및 측정 단계									
	(1) 기존 벽체 + 벽지	(2) 벽지 철거	(3) 벽체 + PE 필름	(4) 벽체 + PE + 벽지						
				24.7월		24.8월		24.9월		24.10월
				1차	2차	3차	4차	5차	6차	7차
실내라돈농도 백분위	100.0	110.6	79.4	61.5	75.6	76.9	75.7	83.0	54.2	48.6
저감률 (1)대비)	-	-10.6%	20.6%	38.5%	24.4%	23.1%	24.3%	27.0%	45.8%	51.4%



[그림 5-1] 시공 및 측정단계별 실내 라돈농도 측정결과 비교

벽지 시공 후 1~5차 측정에 비해 6,7차 측정에서 저감률이 상승하여 권고기준치 이내로 저감된 것은 계절 변화에 따른 실내 상대습도 환경의 변화에 기인하였을 가능성이 존재한다. 그러나 공동주택 실내 라돈농도에 영향을 미치는 요인은 실내외 라돈 발생원 외에도 실내외 차압, 기밀성능과 밀폐상태, 실내 온습도 등 다양한 변수가 존재한다. 따라서 저감 시공 세대의 장기 측정과 다양한 변수에 따른 추가 측정 등을 통해 저감률의 변화 원인을 분석할 필요가 있다.

그럼에도 불구하고, 4장에서의 소형공동주택 현장 측정 실험과 본 장에서의 1~5차 측정 결과를 볼때, 필름형 재료인 PE필름 적용으로 25% 수준의 실내라돈농도 저감이 확인되었으며, 이는 측정대상 세대와 같은 전용면적 26 m² Type 의 세대에서 권고기준치를 초과하는 세대의 라돈 저감을 위해 필름형 재료를 실내 표면적 25%에 해당하는 내력벽에 라돈 저감을 위한 필름형 재료를 시공하였을 경우 기준치 초과 세대의 대부분에 해당하는 200 Bq/m³ 이하의 농도를 보이는 세대에서 기준치 이내로 관리할 수 있는 방안으로 활용할 수 있다고 사료된다.

본 연구과제에서 수행하는 세대에 PE필름을 시공하고 3개월간 관찰한 결과, 시공이나 시공 후 외관상 문제는 발생되지 않았다. 다만, 산소투과도가 극히 낮은 재료인 PE 필름을 콘크리트 벽체에 적용하기 위해서는 필름을 콘크리트 벽체에 부착하였을 때 실내에 발생할 수 있는 습환경의 변화 등에 대해 면밀히 분석하고 적용성을 판단할 필요가 있다.

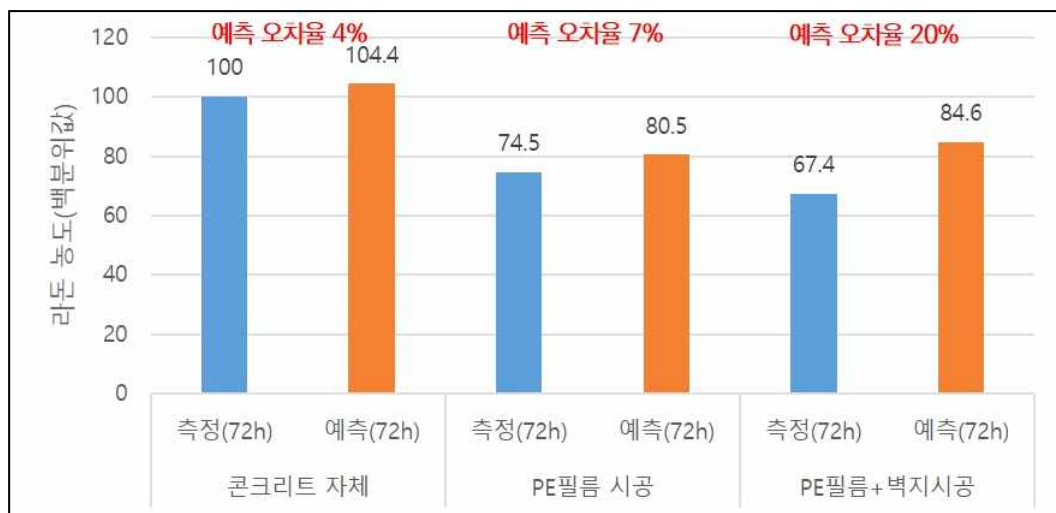
실내 라돈 농도가 고농도인 경우 저감 효과를 높이기 위해서는, PE 필름의 시공 면적을 본 연구에서 적용한 면적보다 증가할 필요가 있다. 본 연구과제에서는 25%의 내부 표면적에 해당하는 부위에만 시공한 결과만을 측정하였기 때문에 적용 면적을 증가시킨 경우의 효과에 대해 검토(예측)하거나 실제 시공 후 측정을 통하여 확인하는 과정이 필요하다.

본 연구과제 범위 내에서는 시공 면적을 증가시켜 실제 시공 후 측정에는 한계가 있어, 동일한 소형 공동주택에서 구조체 부위별 표면 라돈 방출량을 측정한 선행연구 결과와 본 연구의 실험 결과를 바탕으로 모든 구조체에 PE 필름을 시공할 경우를 가정하여 시공 단계에 따른 세대 내 공기 중 라돈 농도 저감 효과를 예측하는 방법을 제안하고자 하였다.

이병희 외(2023)의 연구에서는 콘크리트 구조체 부위별 표면 라돈량을 측정한 본

연구와 동일한 소형 공동주택 26m² 세대를 대상으로 내력벽 8.31 Bq/m²·h, 비내력벽 0.26 Bq/m²·h, 천장 1.1 Bq/m²·h, 바닥 0.24 Bq/m²·h의 표면 라돈 방출량을 보고하였으며 부위별로 방출량의 차이가 있음을 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 선행 연구에서 보고된 부위별 표면 방출량의 비율(내력벽 대비 방출량 비율 기준, 비내력벽 3%, 천장 13%, 바닥 3%)을 반영하여 라돈 농도 저감효과를 예측하는 방법을 제시하고자 한다. 실내 벽체 위 PE 필름 및 벽지 시공에 단계에 따른 부위별 표면 라돈 방출량은 본 연구에서 측정된 벽체의 시공 단계에 따른 평균 표면 라돈 방출량에([표 5-2] 참조) 선행연구에서 보고된 부위별 표면 방출량의 비율을 곱하여 시공 단계에 따른 부위별 표면 방출량을 추정하였다.

기존 벽체 콘크리트 자체와 벽체에 PE 필름 및 벽지를 시공 한 세대 내 공기 중 라돈 농도 측정값과의 검증을 수행한 결과, [그림 5-2]와 같이 예측 오차율은 콘크리트 자체와 PE만 시공한 경우에서 각각 4%와 7%의 낮은 오차율을 나타낸 반면 PE 필름과 벽지를 시공한 경우에는 20%로 상대적으로 높은 오차율을 나타내었다. 이는 앞서 언급한 바와 같이, 벽지의 습윤으로 인한 영향으로 벽지 시공 후의 높아진 라돈 표면 방출량에서 과대 평가된 측정값의 영향일 가능성이 있다. 또한 실내 라돈농도 기여도에 반영되지 않은 실내라돈 발생원 또는 유입 요인의 가능성을 배제하기 어렵다. 이는 향후 추가 측정 및 연구과제 수행을 통해 충분한 데이터를 확보한다면 시공 전 라돈농도 저감효과 예측의 정확성을 높일 수 있을 것이라 판단된다.



[그림 5-2] 세대내 공기중 라돈농도 예측 검증 결과

2. 연구결과 종합 및 한계점

본 연구 수행결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 필름형 재료 조사 및 선정 재료에 대한 품질 특성 분석

TVOC, HCHO 등 실내공기 오염물질 방출 문제가 없고, 공동주택 실내 마감재료 시공 가능한 재료 중 기밀, 방수, 단열, 라돈 저감의 4가지 항목으로 분류하였고, 이 중 4종의 필름형 재료 후보군을 선정하였다. 선정된 필름형 재료의 주요 원료 구성 및 두께는 기밀 필름 PP(폴리프로필렌) + PE(폴리에틸렌) 0.19 mm, 방수 필름 PP + PP 0.28 mm, 라돈 저감 필름 HDPE(고밀도 폴리에틸렌) 0.28 mm, 단열 필름 AL(알루미늄) + 부직포 + AL 0.4 mm 이다. 필름형 재료의 품질특성을 분석하기 위해 ASTM F - 1927 규격에 따라 20°C, 65% 조건에서 산소 투과도 시험을 수행하였으며 그 결과 단열 필름 > PE 필름 > 기밀 필름, 방수 필름 순으로 분석되었다.

(2) 콘크리트 시편을 이용한 필름형 재료의 라돈 방출 측정

콘크리트 시편을 이용하여 필름형 재료 4종의 표면 라돈 방출농도를 측정하였다. 라돈 표면 방출량은 평형 상태를 가정하여 평형 시간(48h 또는 72h) 이후 24시간 동안의 밀폐 챔버 내 평균 라돈 농도를 활용하여 산정하였다. 또한, 평형 상태에서의 라돈 표면 방출량 산정은 실험시 마다 시편, 필름형 재료 및 시공 단계에 따라 변화하는 밀폐 챔버의 기밀도에 영향을 받으므로, 매 단계마다 밀폐 챔버의 공기 교환을 측정을 수행하였다.

측정 결과, 필름형 재료 시공 후 기존 콘크리트 시편 대비(밀폐 챔버 내 라돈 농도 129.9 Bq/m³, 표면 라돈 농도 18.2 Bq/m²h) PE 필름이 밀폐 챔버 내 라돈 농도는 36.8 Bq/m³(74% 저감), 표면 라돈 방출량의 경우 0.45 Bq/m²h(98% 저감)로 가장 우수한 라돈 방출 저감률을 나타내는 것으로 분석되었다. 필름형 재료에 벽지까지 시공한 단계에서도 마찬가지로 PE 필름이 각각 50.2 Bq/m³(64% 저감), 0.75 Bq/m²h(97% 저감)으로 나타나 모든 단계에서 PE 필름이 가장 우수한 라돈 방출 저감능을 나타냈다. 벽지가 시공된 콘크리트 시편의 챔버 내 라돈 농도 및 표면 라돈

방출량은 소형 공동주택 현장에 부착되어 있던 벽지를 철거 후 사용함에 따라, 벽지의 습윤으로 인해 필름형 재료가 시공된 경우에 비해 상대적으로 높게 나타낸 것으로 판단된다.

(3) 실물 크기 벽체를 이용한 라돈 방출 관련 Mock-up 실험

시편을 이용한 실험에서 라돈 방출 농도 저감률이 가장 우수한 PE 필름에 대해 항온항습이 가능한 외단열 챔버에 설치된 $200 \times 300 \times 20$ (mm) 크기의 콘크리트 실물 벽체에 5개 지점에서의 벽체, 필름 시공, 벽지 시공 단계로 밀폐 챔버 농도 및 표면 라돈 농도를 측정하였다. PE 필름 시공 및 벽지와 함께 시공함에 따라 기존 Mock-up 벽체 대비 ($1,170.6 \text{ Bq/m}^3$, $77.6 \text{ Bq/m}^3\text{h}$) 각각 밀폐 챔버 라돈 농도 기준 65%와 51% (405.7 Bq/m^3 , $58.4 \text{ Bq/m}^3\text{h}$), 표면 라돈 방출량 기준 97%와 94% ($2 \text{ Bq/m}^3\text{h}$, $4.9 \text{ Bq/m}^3\text{h}$)의 라돈 방출 저감률을 나타내는 것으로 분석되었다. 한편, Mock-up 외단열 기후변화 챔버 내 실내 공기 중 평균 라돈 농도는 PE 필름 시공 전 $78.3 \pm 13.1 \text{ Bq/m}^3$, PE 필름 시공 후 $70.6 \pm 14.8 \text{ Bq/m}^3$, PE 필름 및 벽지 시공 후 $70.4 \pm 16 \text{ Bq/m}^3$ 로 각각 9.8%, 10.1%, 평형 시간 120 시간 기준 각각 최대 20%와 25%의 저감률을 나타내었다.

(4) 소형 공동주택을 이용한 라돈 방출 관련 현장 실험

소형 공동주택의 PE 필름을 이용한 라돈 방출 관련 현장 실험은 26m^2 Type 공가 1세대 내에서 수행하였다. PE 필름 적용은 실내 라돈 농도에 가장 기여도가 높고 시공이 용이한 좌우측 내력벽($4.7 \times 2.3 \text{ m}$, $3.6 \times 2.3 \text{ m}$)의 3개 지점에 대해서 수행되었으며, 이는 전체 세대 내 콘크리트 구조체 표면적의 25.5%에 해당한다. 측정결과, PE 필름 시공 및 벽지와 함께 시공함에 따라 기존 측정 세대 벽체 의 밀폐챔버 라돈 농도($2,058.3 \text{ Bq/m}^3$) 및 표면 라돈 방출량($51.7 \text{ Bq/m}^3\text{h}$)에 대비하여 각각 밀폐 챔버 라돈 농도 기준 78%(465 Bq/m^3 , PE필름 시공)와 64%(737 Bq/m^3 , PE+벽지시공), 표면 라돈 방출량 기준으로는 각각 97%($1.7 \text{ Bq/m}^3\text{h}$, PE필름 시공)와 84%($8.4 \text{ Bq/m}^3\text{h}$, PE+벽지시공)의 라돈 방출 저감률을 나타내는 것으로 분석되었다. 측정 세대의 실내 공기 중 라돈 농도는 평형 시간 48시간을 기준으로 벽체 자체 460 Bq/m^3 , PE 필름 시공 후 344.1 Bq/m^3 , PE 필름 및 벽지 시공 후 336 Bq/m^3 으로 각각 25%,

27%의 저감률을 나타내는 것으로 분석되었다.

(5) 필름형 재료를 이용한 공동주택 라돈 농도 저감 방안

본 연구 수행 결과, 실내 라돈 농도에 기여도가 큰 내력벽에 라돈농도 저감을 위해 필름형 재료인 PE필름을 시공한 경우, 시공된 위치에서의 표면 라돈 방출량 저감은 85% 수준이며 실제 세대 내 실내 공기 중 라돈 농도에 미치는 영향은 25~27% 저감가능한 것으로 나타났다. 이는 기준치를 초과한 세대 중 200 Bq/m³ 이내의 실내 라돈농도를 보이는 세대에 적용할 경우 기준치 이내로 실내 라돈농도의 관리가 가능할 것으로 판단된다. 이보다 라돈 농도가 높은 고농도의 세대에서 저감 효과를 확인하기 위해서는 내력벽 외에도 실내 라돈농도에 영향을 주는 비내력벽, 천장 및 바닥에 PE필름의 설치 면적 증가가 필요하며, 이에 따른 세대 내 실내 공기 중 라돈 농도 저감 효과 분석이 요구된다.

본 연구에서 벽체에 PE필름의 시공은 벽체 전체에서 벽지의 봉투붙임을 위한 상하 좌우의 접착면(15~20cm)을 제외한 부분에 통으로 부착하였다. 시공상 찢어짐의 문제나 시공후 외관상 특이점은 발견되지 않았으나, 기체 및 습기의 투과율이 낮은 PE필름 재료의 특성상, PE필름 시공에 따른 실내 습환경 등에 미칠수 있는 영향을 확인하여야 한다.

본 연구과제에서는 필름형 재료를 이용하여 라돈 저감 효과를 확인 및 평가하고자 하였다. 본 연구과제에서 라돈 저감을 위해 선택한 필름형 재료인 PE필름은 극히 낮은 가스투과도를 갖는 재료로서, 기존 실내마감재 중에도 PVC 벽지 등 PE필름과 유사하게 가스투과가 낮은 물성을 갖는 재료로 이루어진 마감재들이 존재한다. 본 연구과제에서 PE필름의 라돈 저감 성능에 대해서는 표면 저감률 85% 이상 가능함을 확인하였으나, PE필름의 마감재 적용에 대한 한계점을 고려할 때 다양한 마감재를 통한 라돈 저감 방안이 필요하다. 따라서 추후 연구과제를 통해 벽지, 타일, 보드 등 기존 실내 마감재의 적용과 실제 시공에 따른 조합시 라돈 저감 효과를 확인하고, 필름형 재료를 비롯한 저감 자재와 기존 마감재의 적용방안에 대해 판단할 필요가 있다.

참고문헌 Reference

- 국립환경과학원(2022), “라돈저감 이렇게 하세요”
- 국립환경과학원(2024), 실내공기질 공정시험기준
- 국토교통부(2021), 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙(2021.08.27. 시행)
- 권영제, 손민영, 조상호, 백경열, 조계용(2021), “식품포장재에 적용되는 소재 및 기체차단 특성”, Polymer Science and Technology.
- 윤덕영, 정재원(2020), “실내외 온습도와 실내 라돈 농도를 이용한 실내 라돈 농도 예측 모형”, The Journal of Korean Institute of Information Technology
- 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 연구」 최종보고서, LH 토지주택연구원
- 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
- 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)
- American Society for Testing and Materials(ASTM), 2017, E1465-08a : Standard Practice for Radon Control Options for the Design and Construction of New

Low-Rise Residential Buildings

- B. Ruvira, B. Gracia-Fayos, B. Juste, J. Arnal & G. Verdu, 2022, "Experimental estimation of the diffusion coefficient in radon barrier materials based on ISO/TS 11665-13:2017", Radiation Physics and Chemistry.
- B. Papp & C. Cosma, 2015, "Methods for measuring radon diffusion parameter of waterproof membranes", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry.
- Canadian General Standards Board(CGSB), 2023, Radon mitigation options for existing low-rise residential buildings
- D. Pressyanov, S. Georgiev, I. Dimitrova, K. Mitev & T. Boshkova, 2011, "Determination of the diffusion coefficient and solubility of radon in plastics", Radiation Protection Dosimetry.
- G. Janet, L.Y. Ethan, G. Gnanamurugan, N. Gang, W. Jeffrey & Z.L. Zhou, 2021, "Radon infiltration building envelope test system: evaluation of barrier materials", Radiation Protection Domestic.
- International Commission on Radiological Protection(ICRP), 2008, Recommendations of the ICRP
- J. Chen, J. Ly, E. Schroth, S. Hnatiuk, E. Frenette & M. Blain, 2009, "Radon diffusion coefficients of vapour barrier membranes used in Canadian building construction", Radiation and Environmental Biophysics.
- K. Akbari, J. Mahmoudi, M. Ghanbari, 2013, "Influence of indoor air conditions on radon concentration in a detached house", Journal of Environmental Radioactivity
- L. Felicioni, M. Jiranek & A. Lupišek, 2023, "Environmental impacts of waterproof membranes with respect to their radon resistance", Sustainable Materials and Technologies.
- J.Y.Lee.,S.G.Kang(2021), "Prediction of Indoor Concentration through the Exhalation from Korean Yellow Residual Soil, Hwangtoh as a Building Material", J.Korean Wood Sci. Technol, 49, 122-133.

- M. Jiranek & J. Hůlka, 2001, "Applicability of various insulating materials for radon barriers", Science of The Total Environment.
- M. Jiranek & M. Kotrbata, 2011, "Radon diffusion coefficients in 360 waterproof materials of different chemical composition", Radiation Protection Dosimetry.
- M. Jiranek & V. Kačmaříková, 2019, "Radon diffusion coefficients and radon resistances of waterproofing materials available on the building market", Journal of Environmental Radioactivity.
- S. Singh, J. Singh & L. Singh, 2005, "The study of some common plaster coating materials and plastic foils as a barrier to radon", Radiation Measurements.
- S. Georgiev, K. Mitev, C. Dutsov, T. Boshkova & I. Dimitrova, 2019, "Partition Coefficients and Diffusion Lengths of ^{222}Rn in Some Polymers at Different Temperatures", International Journal of Environmental Research and Public Health.
- W.Z. Daoud & K.J. Renken, 2001, "Laboratory assessment of flexible thin-film membranes as a passive barrier to radon gas diffusion", Science of The Total Environment.
- World Health Organization(WHO), 2009, WHO handbook on indoor radon
- World Health Organization(WHO), 2021 , Policies, regulations & Legislation promoting healthy housing: A review
- Y. Nam, S. Kim, J. Shin, C. Yi, K. S. Jeong, S. K. Lee, J. Ko, J. Lee, 2024, "Radon concentration and affecting environmental conditions in water-curtain heated cultivation facilities", Heliyon