

방사성 물질 방출 저감자재 적용 방안 연구

연구지원 2021-00호

## 방사성 물질 방출 저감자재 적용 방안 연구

지은이 전주영 · 이병희 · 김선동 · 황인태 · 고흥석 · 오동현

발행인 허남일

발행처 한국토지주택공사 토지주택연구원

편 집 전주영 · 이병희 · 김선동 · 황인태

주소 (우)305-731 대전광역시 유성구 엑스포로 539번길 99

전화/전송 042) 866-8565 / 866-8547

전자우편 jychun@lh.or.kr

홈페이지 <http://lhi.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.

연구지원 2021-00

방사성 물질 방출 저감자재 적용 방안 연구  
A study on the Application of Radon Mitigation  
Materials to Reduce Radiation Material



## 참여연구진

### 연구총괄

전주영 LH 토지주택연구원 연구위원

### 공동연구진

이병희 LH 토지주택연구원 책임연구원

김선동 LH 토지주택연구원 연구원

황인태 LH 토지주택연구원 연구원

고홍석 LH 고객품질혁신단 차장

오동현 LH 주택기술처 차장

### 연구심의위원(가나다순)

권재관 LH 고객품질혁신단 부장

김중엽 LH 토지주택연구원 선임연구위원

김지혜 광운대학교 교수

노 열 전남대학교 교수

류옥현 LH 인천지역본부 차장

임범석 LH 주택기술처 부장

# 연구 요약

국외의 주택에서 라돈의 유입경로는 주로 토양 및 지하수가 주요 발생원이나 국내 공동주택은 콘크리트 벽식구조의 특성으로 무기질 건축자재의 사용량이 많아 정부 조사결과에 따르면 권고기준 초과가 예상되어 민원 등 분쟁발생이 우려되고 있다. 공사는 실내 라돈 저감을 목표로 「건축자재 방사성물질 저감 가이드라인」(‘19.09. LH 고객품질혁신단)을 구축하여 건축자재의 방사성물질을 관리하고 있다.

사전 자재관리만으로 실내 라돈농도 제어에 한계가 있으므로 다양한 자재유형 및 환기 등 환경여건을 검토하여 콘크리트 등 자재의 라돈 저감이 가능한 피막도포제 및 차폐재 등을 활용한 라돈저감 등과 같은 대책마련이 필요하다.

본 연구에서는 콘크리트 등 건축자재에 라돈 저감이 가능한 도포제 및 차폐재 등을 적용하여 무기질 건축 자재에서 방출되는 라돈 감소 효과를 분석을 바탕으로 사 후 관리를 통한 실내 표면 라돈 방출 저감을 목적으로 하였다.



그림 1 라돈 방출 저감 자재 성능평가 과정

## □ 라돈 저감자재 조사 및 현황 고찰

기존 문헌조사결과, 건축자재의 라돈 방출량 측정방법에 대한 공인된 측정기준이 부재한 현 상황에서 라돈 저감자재에 대한 생산업체의 자체 성능평가만 있는 상황이다. 국외의 경우 기존 방수재료 성능을 보완한 멤브레인 재료들이 다수를 이루고 있다. 본 연구에서는 기존 공동주택의 적용 등 건축자재 사후 관리 목적을 위해 실내에 직접 적용이 가능한 라돈 차단 도료제를 대상으로 라돈 저감 성능 평가를 수행하였다.

## □ 챔버활용 건축자재 라돈방출량 저감성능 평가

라돈 챔버 활용 라돈 방출량 및 저감효과 실험을 수행하였다. 실험 시편을 대상으로 라돈 저감 도료 도포 전/후의 라돈 방출량을 측정, 비교분석하였다. 라돈 저감 도료 적용 전/후의 실험 시편의 표면 라돈 방출량 비교 결과, 25개 시편에서 약 2% ~ 77% 까지 라돈 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 일부 도료의 경우, 실험 시편에 적용 후 표면 라돈 방출량이 증가하였다(총 8종 제품, 약 18개 샘플). 또한, 5종 도료의 평균 표면 라돈 방출량 측정을 비교한 결과, 총 7종의 시료에서 약 12~58 %의 라돈 저감 효과가 나타났다. 반면, 총 8종의 시료에서 라돈 저감 효과가 나타나지 않았다.



그림 2 실험시편 표면 라돈 방출량 측정



그림 3 라돈저감도료 도장 작업

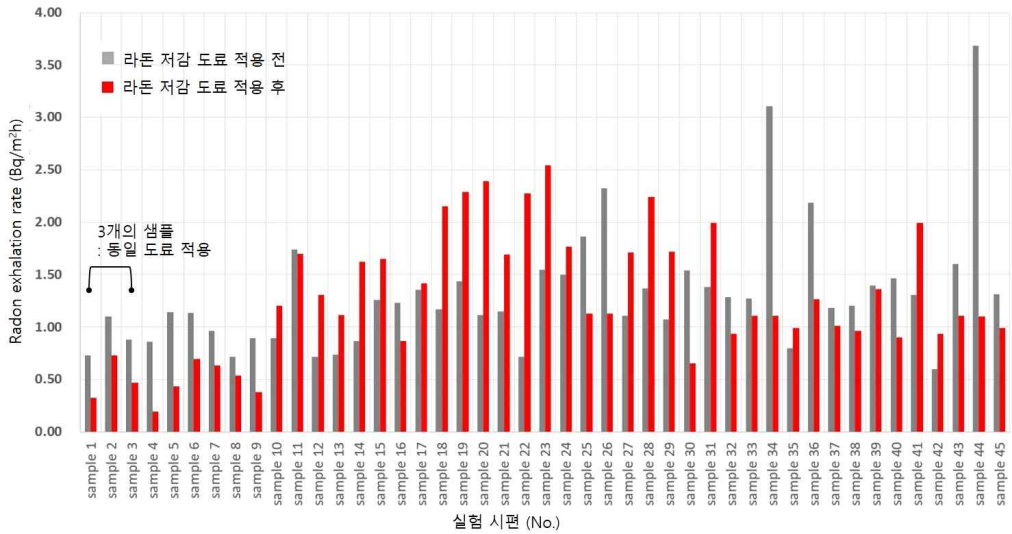


그림 4 표준시편 표면 라돈 방출량 (라돈저감도료 도장 전/후)

#### □ 목업활용 건축자재 라돈방출량 저감성능 및 적용성 평가

라돈 저감 도료 적용 전/후 표면 라돈 방출량 비교하기 위하여 LH 토지주택연구원 내 실증주택(벽식 구조, 46m<sup>2</sup> type)을 대상으로 측정을 수행하였다. 도료 적용 전, 실내 라돈 농도는 증가하는 추세를 보였으며, 도료 적용 직후 실내 라돈 농도는 도료 적용 전과 유사한 속도로 증가하였다. 도료 적용 약 80시간(3.3일) 경과 후부터 실내 라돈 농도가 감소하기 시작하였다.



그림 5 실증주택 도료 시공 및 실내 라돈 농도 측정

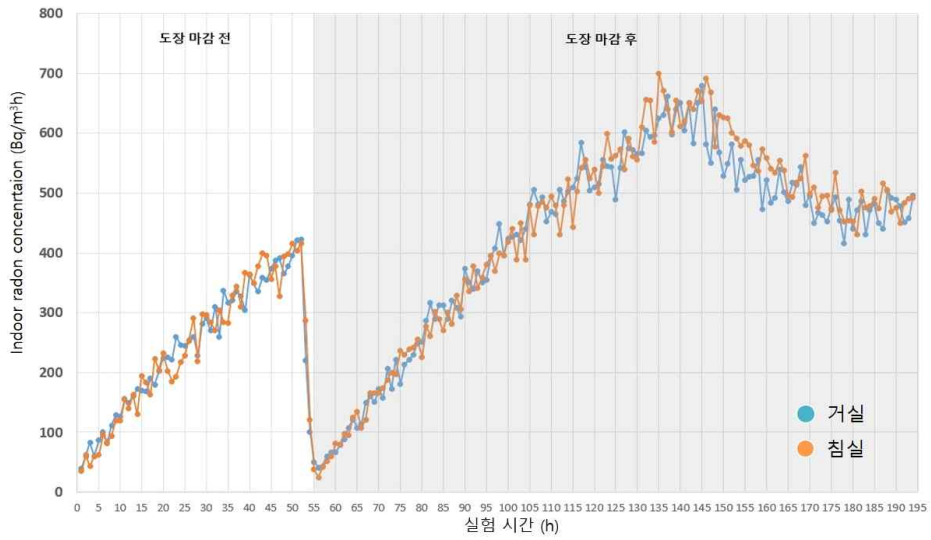


그림 6 라돈 저감 도료 전/후에 따른 실내 라돈 농도 비교

주제어 오염물질, 방사성물질, 저감자재, 건축자재, 사후저감

# 차 례

제1장 서 론 .....	1
1. 연구배경 및 목적 .....	3
2. 연구 내용 및 방법 .....	7
제2장 라돈 저감자재 조사 및 현황 고찰 .....	11
1. 국내외 라돈 저감자재 현황 및 실태조사 .....	13
2. 평가대상 라돈 저감 자재 선정 .....	17
제3장 건축자재 라돈방출량 저감성능 평가 .....	21
1. 건축자재 라돈방출량 분석방법 .....	23
2. 라돈 챔버 활용 라돈 방출량 및 저감효과 실험 및 평가 .....	25
3. 실험 시편 표면 라돈 방출량 측정결과 .....	28
4. 라돈 방출량 및 챔버 내 라돈 농도 측정 결과 분석 .....	32
5. 실증 주택 활용 라돈 저감자재 적용 평가 .....	39
제4장 결 론 .....	47
참고문헌 .....	51
부록 .....	55



## 표 차례

[표 1-1] 환경부 신축 공동주택 실내 라돈 농도 조사 결과 .....	4
[표 1-2] 연구 주요내용 및 수행방법 .....	9
[표 2-1] 국외 라돈 차단재 조사 .....	14
[표 2-2] 국내 라돈 차단재 조사 .....	15
[표 2-3] 라돈 저감도료 선정 기준 .....	18
[표 2-4] 라돈 저감 자재 선정 리스트 및 특징 .....	19
[표 3-1] 건축자재 라돈 방출량 분석방법 .....	23
[표 3-2] 라돈저감 도료 마감 후 측정결과(Sample 1) .....	32
[표 3-3] 라돈저감 도료 마감 후 측정결과(Sample 2) .....	34
[표 3-4] 라돈저감 도료 마감 후 측정결과(Sample 8) .....	36
[표 3-5] 라돈 저감 효과 도료 및 특징 .....	38



## 그림 차례

[그림 1-1] 공동주택 층별 실내 라돈 농도 분포 .....	5
[그림 1-2] 공동주택 층별 실내 라돈 농도 변화 .....	5
[그림 1-3] 실내 라돈 주요 방출원 .....	6
[그림 1-4] 공동주택 라돈 관리를 위한 연구과제 수행 .....	8
[그림 2-1] 라돈 방출 저감 자재 성능평가 과정 .....	13
[그림 2-2] 라돈저감페인트 예시 .....	17
[그림 2-3] 라돈저감페인트 도장 .....	17
[그림 3-1] Closed vessel을 활용한 건축자재 라돈 방출량 측정 .....	24
[그림 3-2] Open vessel을 활용한 건축자재 라돈 방출량 측정 .....	25
[그림 3-3] 실험 시편 .....	26
[그림 3-4] 실험시편 표면 라돈 방출량 측정 .....	26
[그림 3-5] 라돈저감도료 도장 작업 전 .....	26
[그림 3-6] 라돈저감도료 도장 작업 .....	26
[그림 3-7] 실험시편 (라돈저감도료 도장 후) .....	27
[그림 3-8] 실험시편 도료 도장 .....	27
[그림 3-9] 표준시편 표면 라돈 방출량 (라돈저감도료 도장 전) .....	28
[그림 3-10] 표준시편 라돈 방출량 및 표면 라돈 방출량 (라돈저감도료 도장 전) .....	29
[그림 3-11] 표준시편 표면 라돈 방출량 (라돈저감도료 도장 전/후) .....	30
[그림 3-12] 실험시편 표면 라돈 방출량 (라돈저감도료 도장 전/후 비율) .....	31
[그림 3-13] 실험시편 표면 라돈 방출량 (라돈저감도료 도장 전/후 비율) .....	31
[그림 3-14] 라돈저감 도료 적용 후 실내 라돈 농도 (Sample 1) .....	32
[그림 3-15] 라돈저감 도료 적용 후 표면 라돈 방출량 (Sample 1) .....	33
[그림 3-16] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 1) .....	33
[그림 3-17] 라돈저감 도료 적용 후 실내 라돈 농도 (Sample 4) .....	34

[그림 3-18] 라돈저감 도료 적용 후 표면 라돈 방출량 (Sample 4) .....	35
[그림 3-19] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 4) .....	35
[그림 3-20] 라돈저감 도료 적용 후 실내 라돈 농도 (Sample 8) .....	36
[그림 3-21] 라돈저감 도료 적용 후 표면 라돈 방출량 (Sample 8) .....	37
[그림 3-22] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 8) .....	37
[그림 3-23] 실증주택 도료 적용 전 실내 라돈 농도 측정 .....	39
[그림 3-24] 실증주택 도료 시공 및 실내 라돈 농도 측정 .....	40
[그림 3-25] 세대 벽 표면온도 측정(1층) .....	41
[그림 3-26] 세대 벽 표면습도 측정(1층) .....	41
[그림 3-27] 세대 벽 표면온도 측정(2층) .....	41
[그림 3-28] 세대 벽 표면습도 측정(2층) .....	41
[그림 3-29] 라돈 저감 도료 전/후에 따른 실내 라돈 농도 비교 .....	42
[그림 3-30] 라돈 저감 도료 적용 유무에 따른 실내 라돈 농도 비교 ..	43
[그림 3-31] 라돈 저감 도료 전, 실내 라돈 농도 변화 .....	43
[그림 3-32] 라돈저감 도료 적용 직후, 실내 라돈 농도 변화 .....	44
[그림 3-33] 라돈저감 도료 적용 후, 실내 라돈 농도 변화 .....	45

#### \* 부록

[그림 1] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 1) .....	56
[그림 2] 2시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 2) .....	56
[그림 3] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 3) .....	57
[그림 4] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 4) .....	57
[그림 5] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 5) .....	58
[그림 6] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 6) .....	58
[그림 7] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 7) .....	59
[그림 8] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 8) .....	59
[그림 9] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 9) .....	60

[그림 10]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 10) .....	60
[그림 11]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 11) .....	61
[그림 12]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 12) .....	61
[그림 13]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 13) .....	62
[그림 14]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 14) .....	62
[그림 15]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 15) .....	63
[그림 16]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 16) .....	63
[그림 17]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 17) .....	64
[그림 18]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 18) .....	64
[그림 19]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 19) .....	65
[그림 20]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 20) .....	65
[그림 21]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 21) .....	66
[그림 22]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 22) .....	66
[그림 23]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 23) .....	67
[그림 24]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 24) .....	67
[그림 25]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 25) .....	68
[그림 26]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 26) .....	68
[그림 27]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 27) .....	69
[그림 28]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 28) .....	69
[그림 29]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 29) .....	70
[그림 30]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 30) .....	70
[그림 31]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 31) .....	71
[그림 32]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 32) .....	71
[그림 33]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 33) .....	72
[그림 34]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 34) .....	72
[그림 35]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 35) .....	73
[그림 36]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 36) .....	73

[그림 37]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 37) .....	74
[그림 38]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 38) .....	74
[그림 39]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 39) .....	75
[그림 40]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 40) .....	75
[그림 41]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 41) .....	76
[그림 42]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 42) .....	76
[그림 43]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 43) .....	77
[그림 44]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 44) .....	77
[그림 45]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 45) .....	78

# 제 1 장 서 론

LAND  
INSTITUTIONS  
AND  
LOCAL  
HUMANITY

&



# 제1장 서론

## 1. 연구배경 및 목적

국외의 주택에서 라돈의 유입경로는 주로 토양 및 지하수가 주요 발생원이나 우리나라의 고층 아파트 중심의 공동주택의 경우에는 지하 주차장 공간 등을 설치하고 있어 토양 및 지하수의 영향 보다는 건축자재에서 방출되는 실내 라돈 방출량이 실내 라돈 방출량 중 높은 비율을 차지 할 것으로 추정 하고 있다. 이에 따라, 공사에 서도 선도적으로 「건축자재 방사성물질 저감 가이드라인」(‘19.09. LH 고객품질혁신단)을 구축하여 건축자재의 방사성물질을 관리하고 있음. 건축자재 방사성물질 관리방식인 ‘방사능 농도지수’(I<1)를 적용하고, 방사능 내부피폭을 고려하여 라듐농도를 130 Bq/kg 이하로 관리하고 있다. 기준 이상 시는 대체자재를 적용시켜야 하며 완공 전 샘플하우스에 우선시공하여 실내 라돈농도를 측정하고 실내농도 148 Bq/m<sup>3</sup> 이상시 방사능 농도가 적은 대체 자재로 변경 적용토록 하였다<sup>1)</sup>.

이후, 「건축자재 라돈 저감 관리 지침서」(‘19.11. 환경부, 국토부, 원자력안전위원회 공동)를 마련해서 정부 차원에서 건축자재의 라돈 관리 지침을 수립함. 공동주택 건축내장재로 사용되는 천연석 기반 자재를 대상으로 방사능 농도 지수(I<1)로 라돈관리 지침을 수립하여 시행하였다(‘20.6 적용)<sup>2)</sup>.

실내공기질관리법 개정에 따라 ‘18년 이후 신규사업승인 신축 공동주택의 라돈 측정이 의무화(권고기준 148 Bq/m<sup>3</sup>) 되었고 대상단지 입주가 본격화 되었다. 또한, ‘20년 의무측정단지는 2개였으나 ‘21년에는 의무측정 단지수가 31개로 확대되었다.

2019년 환경부의 신축 공동주택의 라돈 노출 실태 파악 및 저감방안 마련 연구 시범조사에서 1년 내 서울·경기 지역의 준공된 아파트 60세대 대상으로 라돈농도 조사하였다.

---

1) 건축자재 7종(콘크리트(골재포함), 벽돌, 도기, 타일, 몰탈, 석고보드, 석재) 대상

2) 천연석 기반 자재 대상(육실상판, 현관바닥재, 아일랜드식탁 등 석재)

정부 조사결과에 따르면 60세대 중, 37세대(61.7%)에서 148 Bq/m<sup>3</sup>을 초과한 것으로 나타났으며 밀폐 시 최대 533.5 Bq/m<sup>3</sup> 까지 검출된 것으로 나타났다.

공동주택 단지 내 동일 주동에 위치한 세대의 실내 라돈 농도 측정 결과, 고층부의 평균 실내 라돈 농도가 저층부 또는 중층부에 비해 낮지 않은 것으로 나타났다

이는 토양에 접한 지층일수록 실내 라돈 농도가 높다는 기존 연구결과<sup>3)4)</sup>와 상이한 현상이다. 국내 공동주택 유형이 토양 및 암석 기반의 건축 재료로 이루어진 벽식 구조가 다수임에 따라 국외에서 규정하는 실내 라돈 방출원과는 차이가 있을 것으로 판단한다.

국내 공동주택은 콘크리트 벽식 구조의 특성으로 무기질 건축자재의 사용량이 많기 때문인 것으로 추정 하고 있다. 밀폐조건 외에 환기설비 가동조건에서는 라돈 농도가 크게 감소하는 것을 확인되었으나 밀폐 시에는 권고기준 초과가 우려되어 민원 등 분쟁 발생이 우려되는 상황이다.

[표 1-1] 환경부 신축 공동주택 실내 라돈 농도 조사 결과

(단위 : Bq/m<sup>3</sup>)

단지별 구분 (세대수)	A (6)	B (6)	C (3)	D (9)	E (9)	F (12)	G (3)	H (6)	I (6)
평균농도(밀폐)	104.9	175.3	207.1	172.5	147.1	345.4	84.7	149.6	236.3
평균농도(환기)	46.1	59.9	89.5	65.8	83.3	97.1	60.0	66.2	86.6

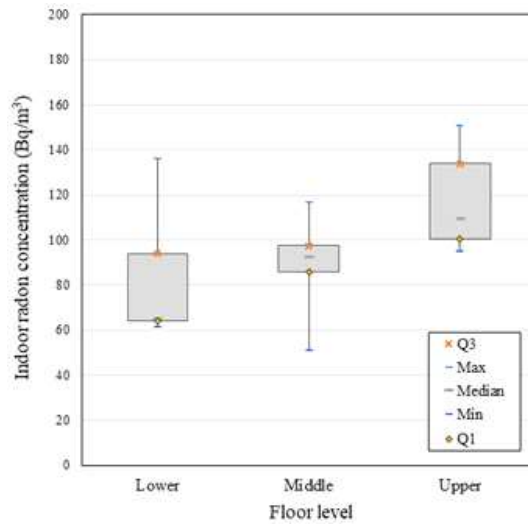
\* 대부분 세대에서 약 2~5시간 환기장치 가동 시 기준(148 Bq/m<sup>3</sup>) 이내로 감소

\* '11~'14년 일상생활 조건(입주민 거주, 90일 측정)에서 실시한 조사 시 아파트의 평균농도는 66.4 Bq/m<sup>3</sup>

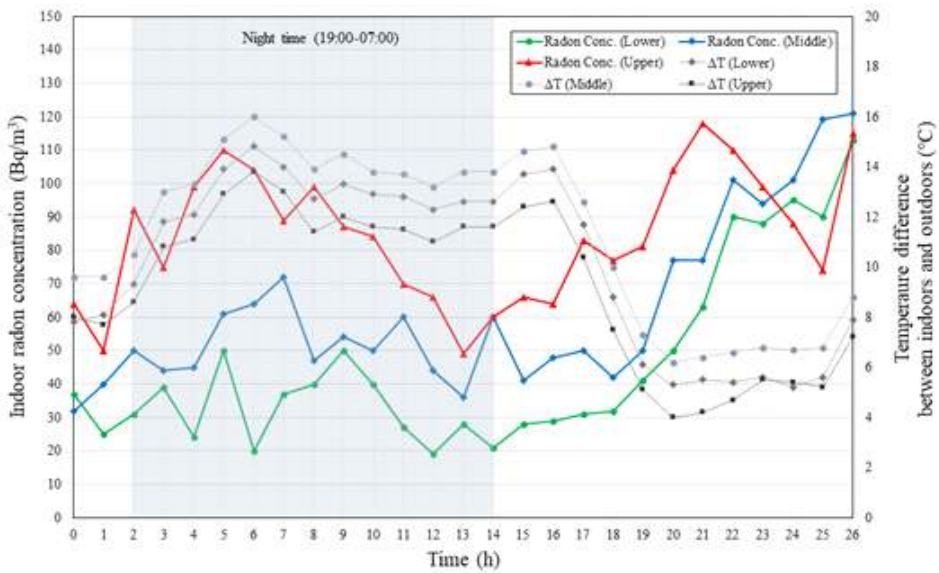
3) Man, C.K., Yeung, H.S. (1999). Modeling and measuring the indoor radon concentrations in high-rise buildings in Hong Kong. Applied Radiation and Isotopes, 50, 1131-1135.

4) Shaikh, A.N., Ramachandran, T.V., Kumar, A.V. (2003). Monitoring and modelling of indoor radon concentrations in a multi-storey building at Mumbai, India. Journal of Environmental

Radioactivity, 67, 15-26



[그림 1-1] 공동주택 층별 실내 라돈 농도 분포

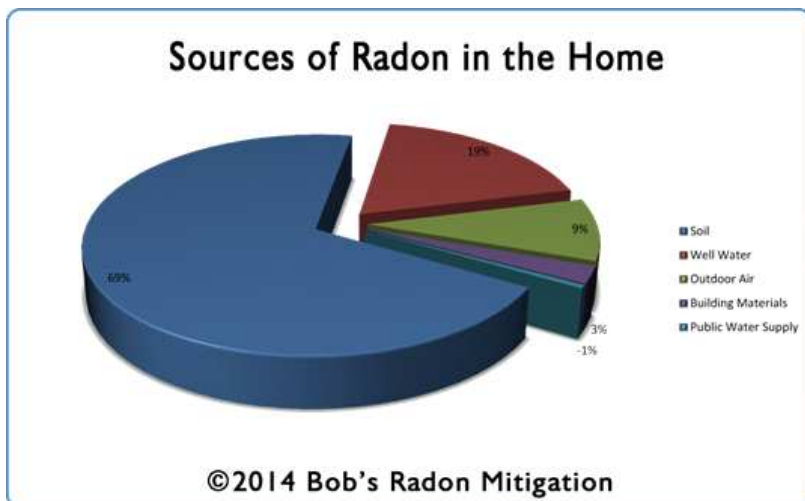


[그림 1-2] 공동주택 층별 실내 라돈 농도 변화

건축자재의 방사성물질 함유량 중심의 LH의 실내 라돈 저감을 위한 자재 관리 기준 및 국토부, 환경부 다부처 중심의 천연 석재 기반의 라돈 관리 지침이 수립되었으나 이를 통한 실내 라돈농도 제어에는 한계가 있다. 실내라돈을 저감시키기 위한 가장 효과적인 방법은 오염원 제어로서 라돈을 방출하는 건축자재 사용을 줄이거나 대체자재를 활용하여야 한다. 라돈은 무기질 계열 건축자재에서 방출되므로 시멘트, 자갈, 모래로 구성된 콘크리트에 대한 제어가 필요하나 이를 대체할 자재가 불가한 상황에서 실내 라돈농도 관리가 어려운 실정이다.

따라서, 사전 자재관리만으로 실내 라돈농도 제어에 한계가 있으므로 다양한 자재 유형 및 환기 등 환경여건을 검토하여 콘크리트 등 자재의 라돈 저감이 가능한 피막 도포제 및 차폐재 등을 적용하여 무기질 건축자재에서 방출되는 오염물질을 줄이는 방안 및 상시환기 등을 활용한 라돈저감 등과 같은 대책마련이 필요하다.

본 연구에서는 콘크리트 등 건축자재에 라돈 저감이 가능한 도포제 및 차폐재 등을 적용하여 무기질 건축 자재에서 방출되는 라돈 감소 효과를 분석을 바탕으로 사후 관리를 통한 실내 표면 라돈 방출 저감을 목적으로 하였다.



출처 : <https://bobsradonmitigation.com/what-is-radon>

[그림 1-3] 실내 라돈 주요 방출원

## 2. 연구 내용 및 방법

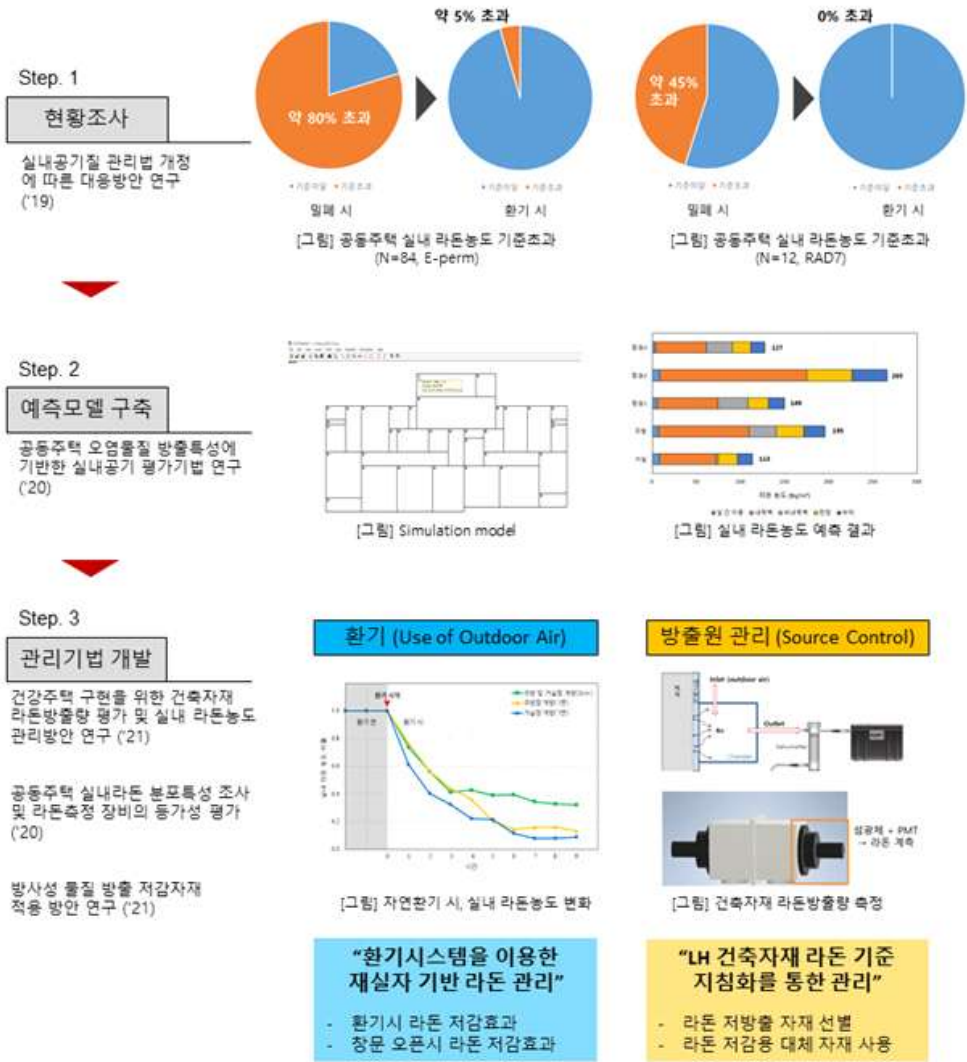
본 연구에서는 건축마감재에 적용하는 라돈 저감을 위한 차폐재 및 피막재 중심의 라돈 저감효과 분석 및 기계환기장치를 활용한 기저환기 제어방안을 목적으로 하며, 본 연구의 주요 내용 및 연구방법은 다음과 같다.

### 1) 주요 연구내용

- 국내외 라돈 저감자재(피막재, 도포재, 흡착재 등) 현황 및 실태조사
- 실험실 실험을 통한 라돈 방출량 저감효과 실험 및 평가
  - \* 라돈 챔버 활용 라돈 방출량 및 저감효과 실험
- 목업실험을 통한 라돈 방출량 저감효과 검증실험 및 평가
  - \* 실증주택(주택성능연구개발센터)의 룸을 활용한 실험
- 라돈 저감자재에 대한 성능 및 시공성 평가를 통한 적용방안 제시



### 2) 연구 수행방법

- 라돈 저감 차단 자재 관련 실험을 위한 시공사례 사전 검토를 충분히 하여 선정 실험
  - \* 실무부서와 협의하여 최종 실험을 위한 차단자재 선정
- 기저 환기량 설정을 위한 환기량에 따른 라돈 저감량 상관관계 분석
- 기저환기량 추정 또는 모델링을 통한 환기량 추정을 통해 초기 기저환기량 실험을 위한 정량적 성능 결정 후 실험을 통해 보정 계획
  - \* 공공주택설비처와 협의하여 환기장치 가동프로세스 검토 및 실험



[그림 1-4] 공동주택 라돈 관리를 위한 연구과제 수행

[표 1-2] 연구 주요내용 및 수행방법

주요 연구내용	연구수행 방법
국내외 라돈 저감자재(피막재, 도포재, 흡착제 등) 현황 및 실태조사	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 국내외 개발된 라돈 저감자재 및 소재 등 조사</li> <li>- 국내 건설사 적용 사례 및 실태 조사</li> </ul>
실내 라돈 방출 차단 자재 적용 방안	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 라돈방출량 측정 챔버(밀폐형)를 활용한 방출량 측정</li> <li>- 콘크리트 기반 공시체를 활용한 기본소재 라돈 방출량 측정</li> <li>- 라돈저감자재 공시체에 적용을 통한 라돈방출 저감량 측정 및 분석 (공시체, 비교군, 저감자재 5종)</li> <li>- rad7 측정장비 활용</li> </ul> 
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 실증주택을 대상으로 목업 실험</li> <li>- 저감자재 적용 전후 라돈 방출량 평가</li> <li>- RAD7 측정장비 활용</li> </ul> 
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 실험실 실험 및 목업실험을 기반으로 저감자재의 라돈 저감 성능 평가</li> <li>- 저감자재의 목업시공시 시공성 평가를 통한 현장적용성 검토</li> <li>- 종합검토를 통한 저감자재 적용방안 제시</li> </ul>



## 제 2 장

## 라돈 저감자재 조사 및 현황 고찰

LANDING THE  
HOUNDSTOOTH  
INSTANT



## 제2장 라돈 저감자재 조사 및 현황 고찰




### 1. 국내외 라돈 저감자재 현황 및 실태조사

기존 문헌조사결과, 건축자재의 라돈 방출량 측정방법에 대한 공인된 측정기준이 부재한 현 상황에서 라돈 저감자재에 대한 생산업체의 자체 성능평가만 있는 상황이다. 국외의 경우 기존 방수재료 성능을 보완한 멤브레인 재료들이 다수를 이루고 있다. 라돈 저감도료를 포함하여 국내에는 실제 공동주택 적용 사례는 미비한 상황이다. 따라서, 저감자재에 대한 실험실 실험 평가 및 실제 현장기반 목업 실험을 통한 성능검증을 실시하여 적용가능성 검토가 필요하다. 환기장치의 라돈 저감 효과는 다수의 문헌과 센터의 기 수행연구에서도 저감성능을 검증 한 바 있으나, 입주자의 환기장치 활용이 미미한 현 상황에서 최소 성능의 환기장치 구동 및 센싱 기반 자동환기 구동 등의 다양한 연동프로세스 검토가 필요하다.



[그림 2-1] 라돈 방출 저감 자재 성능평가 과정







[표 2-1] 국외 라돈 차단재 조사

구분	Radon Barrier Membrane	Radon film Membrane	Radon Block Liquid Vapour Membrane
특 징	<ul style="list-style-type: none"> <li>저밀도 폴리에틸렌 (LDPE) 으로 생산되어 저온에서도 유연성과 강도 좋음</li> <li>시공시 재료를 접친 상태에서 실란트 테이프로 밀봉 함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>필름은 다양한 플라스틱 재료의 복합체로 공기 투과성 측면에서 놀라운 특성을 제공</li> <li>토양 속의 라돈을 차단하고 집에 침투하는 것을 방지합니다. 216 <math>\mu\text{m}</math>의 폴리 아미드를 포함한 합성 소재의 다층 복합체로 방수 차단 특성 제공</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>라돈 인증, 유연성, 단일 구성 요소, 이음매 없는 고무 방수 멤브레인은 주로 지하실 및 기초 벽과 같은 토대 구조물의 외부 방수에 사용. DPC 및 DPM(Damp Proof Membrane)과 결합가능</li> </ul>
장 점	<ul style="list-style-type: none"> <li>높은 인장강도</li> <li>찢어짐에 대한 내구성</li> <li>주택 및 상업용 건물에 사용</li> <li>모든 형태의 DPC (Damp Proof Courses)와 호환</li> <li>쉬운 조인트 및 씰링</li> <li>수분저항성</li> <li>라돈가스 내성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>가볍고 유연하며 저항이 매우 높음</li> <li>표준 200<math>\mu\text{m}</math> 폴리에틸렌 필름보다 100배의 방수 기능</li> <li>습기 방지</li> <li>ISO 9001 인증 생산</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>완전 결합 된 이음매 없는 멤브레인</li> <li>수축이 없는 좋은 신축성</li> <li>프라이머 불필요</li> <li>완벽한 수분차단</li> <li>무용제, 무독성 및 무취</li> <li>불연성 및 무VOCs</li> <li>높은 라돈가스 내성</li> </ul>
사 진	 <p>(Monarflex® RMB400, BMI, UK)</p>	 <p>(film ANTI-RADON, France)</p>	 <p>(Newton 109-LM, JNNewton, UK)</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Membrane Thickness: 0.4mm</li> <li>Color: Red</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Radioactivity exposure test: without film 14150 KBq/ with film 64KBq</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Membrane thickness: 1.0mm</li> <li>Colour: Black</li> </ul>

[표 2-2] 국내 라돈 차단재 조사

구분	라돈방출차단재	라돈실드퍼티	라돈차단도료
특징	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 새집증후군 유발물질 휘발성유기화합물(VOCs), 포름알데하이드(HCHO) 등 유해물질 제로</li> <li>• 라돈/석면, 가루날림 등의 차단 및 완벽한 방수를 요할 때 사용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 천연광물질 에너라이트 성분이 함유된 반고체형의 퍼티로서 쉽게 시공할수 있으며, 페인트 및 바니쉬를 추가적으로 함께 시공하는 방법</li> <li>• 자체실험결과, <math>25\text{Bq/m}^3 \rightarrow 25\text{Bq/m}^3</math>로 저감 (고양시 주택 시공 후)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 도포 시 시멘트 벽면이나 바닥 또는 천정에 0.3mm 두께로 도포</li> <li>• 자체실험 결과, 시멘트 벽돌에서 라돈방사량(<math>\text{pCi/m}^2 \cdot \text{h}</math>)은 <math>8.59 \rightarrow 0.71</math>로 90% 차단효과</li> </ul>
장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 무광 투명</li> <li>• 신축성 뛰어난</li> <li>• 시공후 3-4시간 경화</li> <li>• 액상형으로 시공편리</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 타일, 콘트리트, 석재, 목재 등 소재 구분 없이 사용 가능</li> <li>• 작업시 부착성 우수</li> <li>• 내수성, 유연성 우수</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 바닥면이나 천장, 벽면 등에 도포만으로 유효하게 사용</li> </ul>
저감시공	 (코팅엔, 칼리코, 한국)	 (라돈실드퍼티, 실드엔케어, 한국)	 (실버리아100, (주)파워실버, 한국)
		 라돈실드 퍼티 100% 친환경 소재로 생산된 친환경 퍼티. 라돈가스등 집안내 유해물질 차단 및 중화 뛰어난 부착력, 작업성과 외관성이 우수	 실버리아100 시공 후

(계속)

구분	인플러스 라돈가드	순&수 라돈가드	라돈차단시트																	
특징	<ul style="list-style-type: none"><li>• 라돈 차폐기능 친환경페인트</li><li>• 콘크리트, 시멘트, 몰탈, 석고 등에 시공</li><li>• 일반 실내용 페인트 대비 우수한 차폐효과 (자체실험)</li><li>• 공인기관 시험결과 약 90%의 저감효과</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 특수 아크릴 에멀전 수성 수지 활용, 탄성 보유</li><li>• 탄성으로 크랙방지 기능</li><li>• 페인트 타입 : 상도 (내부벽체용 탄성페인트)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 기체 차폐 및 방수의 복합기능</li><li>• 건축물 바닥재, 내장재로 활용</li><li>• 토양 및 지반의 균열, 바닥과 벽의 이음새 위 밀봉하여 설치</li><li>• 두께 : 2.8mm</li><li>• 색상 : 블랙</li></ul>																	
장점	<ul style="list-style-type: none"><li>• 탄성을 지닌 친환경 아크릴 수지 에멀전 및 내구성이 우수한 기능성 안료 사용, 라돈가스 실내유입을 효과적 저감시킴</li><li>• 인체 유해 유기용제 및 중금속 미사용</li><li>• VOC 함량 최소화 친환경수성페인트</li><li>• 색상 : 백색 및 담색</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 유연한 탄성도막, 미세한 크랙 보완</li><li>• 라돈 차단효과</li><li>• 색상 : 백색</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 우수한 유연성, 내구성, 간편 설치, 저비용 시공시간 단축</li><li>• 라돈 저감율 90%</li></ul> <div></div>																	
저감시공	<div><p>공인시험기관결과</p><table><tr><th>인플러스 라돈가드 도포 콘크리트</th><th>콘크리트 (비원)</th><th>콘크리트 시편 (인플러스 라돈가드)</th></tr><tr><td>라돈수치 (228Bq)</td><td>22.4</td><td>8.3</td></tr><tr><td>도문수치 (220Bq)</td><td>248.0</td><td>17.0</td></tr></table><p>(삼화페인트)</p></div>	인플러스 라돈가드 도포 콘크리트	콘크리트 (비원)	콘크리트 시편 (인플러스 라돈가드)	라돈수치 (228Bq)	22.4	8.3	도문수치 (220Bq)	248.0	17.0	<div><p>라돈차단</p><p>공인기관 시험 결과</p><table><tr><td>마재(대리석)</td><td>150.4</td></tr><tr><td>일반수성(60um)</td><td>135</td></tr><tr><td>워터기드(30um)</td><td>117.1</td></tr><tr><td>라돈가드(100um)</td><td></td></tr></table><p>라돈방출량 (Bq/m²)</p><p>(노루페인트)</p></div>	마재(대리석)	150.4	일반수성(60um)	135	워터기드(30um)	117.1	라돈가드(100um)		<div><p>차단 시트 미설치 123Bq/m³</p><p>차단 시트 설치 20Bq/m³</p></div>
인플러스 라돈가드 도포 콘크리트	콘크리트 (비원)	콘크리트 시편 (인플러스 라돈가드)																		
라돈수치 (228Bq)	22.4	8.3																		
도문수치 (220Bq)	248.0	17.0																		
마재(대리석)	150.4																			
일반수성(60um)	135																			
워터기드(30um)	117.1																			
라돈가드(100um)																				

## 2. 평가대상 라돈 저감 자재 선정

국외에서는 기존 방수재료 성능을 보완하여 라돈 저감용 멤브레인 재료들이 다수 개발되었다. 국내에서는 멤브레인 형태 외에도 페티, 코팅제, 도료 등 액상형 저감 자재가 다양히 출시되었다. 건축자재 라돈 방출량 측정관련 표준시험법이 부재하기 때문에 생산업체별 다양한 방식으로 라돈 차단 자재의 성능 평가를 수행하고 있다.

본 연구에서는 기존 공동주택의 적용 등 건축자재 사후 관리 목적을 위해 실내에 직접 적용이 가능한 라돈 차단 도료제를 대상으로 라돈 저감 성능 평가를 수행하였다. 동일 시험 조건 하에 밀폐 챔버를 이용한 건축자재 라돈 방출량 측정방법을 활용하여 각 도료별 라돈 저감 효과를 추정하였다.



[그림 2-2] 라돈저감페인트 예시



[그림 2-3] 라돈저감페인트 도장

라돈 저감 자재 선정을 위하여 LH공사 내 실무부서(고객품질혁신단, 주택기술처) 외 라돈 차단 도료제 개발 사업을 진행한 회사의견 수렴을 통해 평가대상 도료를 선정하였다.

다음과 같은 조건에 부합하는 라돈 저감 도료를 평가대상으로 선정하였다.

[표 2-3] 라돈 저감도료 선정 기준

구분	내용
평가대상 선정 기준	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기존 공동주택에 사용이 가능하여 시공이 용이한 제품</li> <li>- 실내에 직접 적용이 가능하며 VOCs, HCHO 등 실내공기 오염물질 저방출 제품</li> <li>- 건축자재 단면 접합부 또는 마감재로 활용이 가능한 제품</li> </ul>

또한, 도료 개발사(3개 社) 협의를 통해 시장출시 제품 3종 및 신개발 제품 12종을 선정하였으며, 평가대상 라돈 저감 도료는 모두 수성 페인트 형태, 시장출시 및 개발중인 제품 모두 색상은 백색을 기본으로 선정하였다.

[표 2-4] 라돈 저감 자재 선정 리스트 및 특징

번호	제조사	구분	시료명	특징
1	A	출시	Sample 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 에멀전 성분으로 치밀한 도막 형성</li> <li>• 도막의 탄성으로 미세한 크랙 발생 억제, 라돈차폐</li> </ul>
2	B	출시	Sample 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기능성 고탄성 수지를 이용 라돈 차폐</li> <li>• PG 및 조용제 사용하지 않아 유해물질 방출 최소화</li> </ul>
3	C	출시	Sample 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수용성 아크릴수지를 적용해 부착성과유해물질 저감 도료</li> <li>• 다용도 부착성 우수 제품</li> </ul>
4	C	개발	Sample 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 다양한 소지 및 구도막에 부착력 우수한 도료</li> <li>• 유해물질 및 유해중금속 함유 최소화한 친환경 도료</li> </ul>
5	C	개발	Sample 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 에멀전 수성도료이며, 오염물질 쉽게 닦아낼 수 있음</li> <li>• 폼알데하이드제거 및 항균성, 내곰팡이성 우수</li> </ul>
6	C	개발	Sample 6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 광택을 필요로하는 면에 적용하는 수성도료</li> </ul>
7	C	개발	Sample 7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수용성 아크릴수지를 적용해 부착성과유해물질 저감 도료</li> <li>• 다용도 부착성 우수 제품</li> </ul>
8	A	개발	Sample 8	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 에멀전 성분으로 내수성, 침투성 우수 도료</li> <li>• 표면 기공을 막아 라돈 차폐</li> </ul>
9	A	개발	Sample 9	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 저온(-20℃)에서 도막 형성시 탄성 유지, 치밀한 도막 형성</li> <li>• 건축자재의 크랙저항성 높음, 라돈차폐</li> </ul>
10	A	개발	Sample 10	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 에멀전 성분으로 수분증발이 아닌 가교결합에 의한 도막형성</li> <li>• 표면 기공을 치밀하게차단하여 라돈 차폐</li> </ul>
11	A	개발	Sample 11	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 내수성, 침투성이 우수하며 수분 영향 최소화</li> <li>• 도막형성시 탄성이 유지되며 크랙 저항성 우수,라돈차폐</li> </ul>
12	B	개발	Sample 12	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 특수 비닐수지계 에멀전 제품</li> <li>• 기체 투과율이 낮은 수지를 사용하여 제조</li> </ul>
13	B	개발	Sample 13	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 특수 비닐수지계 에멀전 제품</li> <li>• 판상 형태의 안료를 사용하여 기체 투과를 최소화</li> </ul>
14	B	개발	Sample 14	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 특수 아크릴수지계 에멀전 제품 + 내구성 강화</li> <li>• 건축자재 기공에 대한 침투력이 우수하여 라돈 차폐</li> </ul>
15	B	개발	Sample 15	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수용성아크릴을 주성분으로 한 수용성 락카(DIY용)</li> <li>• 건조시간이 빠르고 투명성, 작업성이 우수</li> </ul>



## 제 3장

# 건축자재 라돈방출량 저감성능 평가





# 제3장 건축자재 라돈방출량 저감성능 평가

## 1. 건축자재 라돈방출량 분석방법

### 1) 건축자재 라돈 방출량 분석방법 비교

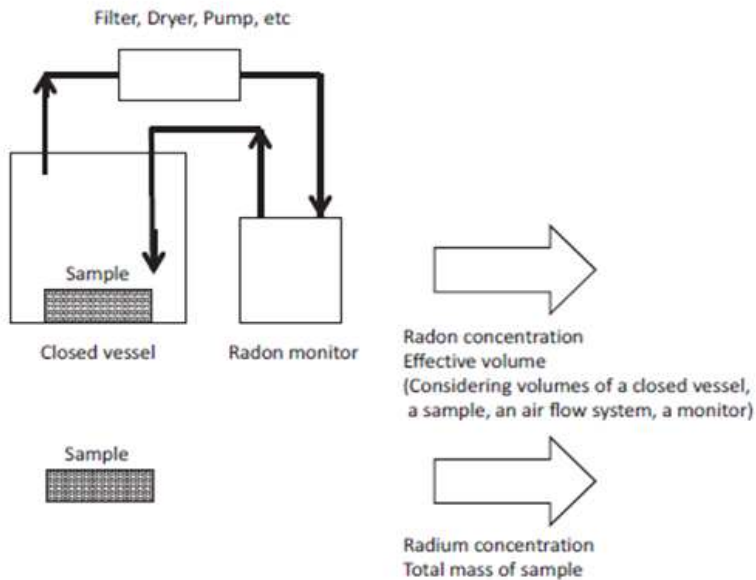
[표 3-1] 건축자재 라돈 방출량 분석방법

조사방법	특 징
Chamber method	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chamber를 사용하여 건축자재로부터 방출된 라돈 농도를 측정함.</li> <li>- 밀폐 환경을 조성하여 주변 환경의 영향을 최소화 할 수 있음.</li> <li>- 비용-효과적 측면을 고려할 때 다른 방법에 효율적임.</li> </ul>
Purge and trap method	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 50% RH 및20℃ 조건에서 라돈 가스를 질소 gas와 함께 일정용기에 포집함.</li> <li>- Chamber 내 고농도 라돈 측정 시, 방출에 의한 일부 손실이 발생할 수 있음.</li> <li>- Back diffusion을 피하기 위해 낮은 유속을 유지하여야 하며 결과가 과소평가될 수 있음.</li> </ul>
Surface measurement method	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 건축자재에 직접 장비를 접촉하여 방출되는 라돈 농도를 측정함.</li> <li>- 다른 라돈 방출량 조사방법과 비교하였을 때 설치 및 조사가 수월함.</li> <li>- 산출결과와 신뢰성이 떨어진다는 단점이 존재함.</li> </ul>
In-situ radon exhalation measurement	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 벽이나 밀폐된 방에서 직접 부착하는 원위치(in-situ) 측정 방식임.</li> <li>- 실제 건축자재 표면에서 방출되는 라돈 농도에 가장 근접한 값을 측정함.</li> </ul>

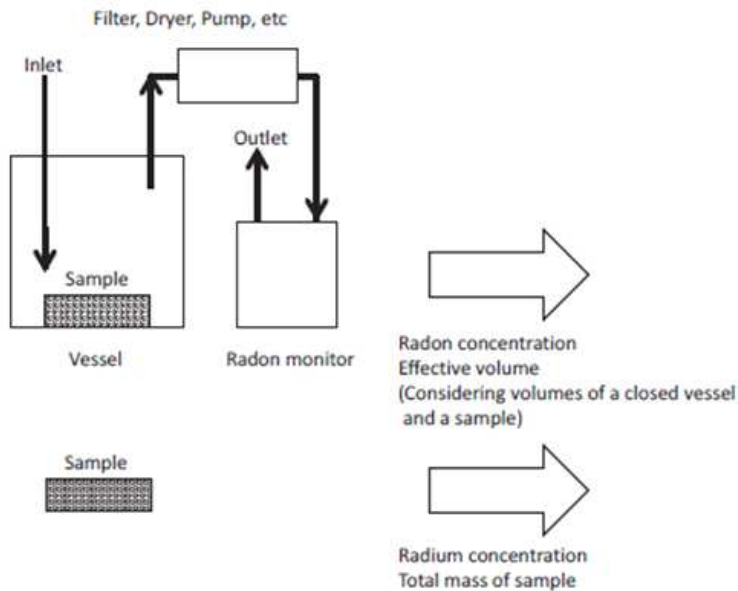
### 2) 건축자재 라돈 방출량 측정방법 선정

건축자재의 라돈방출량을 측정하기 위한 방법으로 앞서 비교한 [표 3-2]의 Chamber Methods는 기밀용기를 이용하여 챔버 내에 준비된 건축자재 샘플을 넣고 밀폐하여 챔버내에 축적되는 라돈 농도를 측정하는 방법이다.

챔버를 이용하는 경우, 밀폐형(Closed loop) 구조 또는 개방형(Open loop) 구조를 활용하여 건축자재 라돈 방출량을 측정할 수 있다. 밀폐형 구조는 최소 4주 이상(방사 평형을 위해) 장기간 측정 또는 낮은 라돈 농도 측정에 유리하며, 개방형 구조는 정상상태에 빠르게 수렴하기 때문에 단기 측정이 가능하나 다양한 실험 오차 요인이 발생하는 특징이 있다. 본 연구에서는 [그림 3-13]과 같이 Closed vessel을 활용하여 건축자재의 라돈 방출량을 측정하였다.



[그림 3-1] Closed vessel을 활용한 건축자재 라돈 방출량 측정



[그림 3-2] Open vessel을 활용한 건축자재 라돈 방출량 측정

## 2. 라돈 챔버 활용 라돈 방출량 및 저감효과 실험 및 평가

### 1) 라돈 저감 자재 적용을 위한 표준 시편 준비

라돈 저감 자재 적용 실험을 위한 시편은 실내 마감재 중 라돈 방출원으로 알려진 화강암을 대상으로 [그림 3-2]와 같이 실험 시편을 준비하였다. 사용한 시편의 크기는 200mm(가로) X 200mm(세로) X 30mm(높이)의 사각형 형태이며, 실험 시편의 균일성을 확보하기 위해 실험 전, 각 시편의 표면 라돈 방출량을 측정/비교 하였다. 다음의 [그림 3-3]은 챔버를 활용하여 실험 시편의 표면라돈방출량을 측정한 모습이다.



[그림 3-3] 실험 시편



[그림 3-4] 실험시편 표면 라돈 방출량 측정

## 2) 라돈 저장 도료 적용에 따른 성능평가

실험 시편을 대상으로 라돈 저장 도료 도포 전/후의 라돈 방출량을 측정, 비교하였다. 실험의 재현성 확보 및 실험오차 최소화(실험장비, 표준 시편 차이 등)를 위해 동일한 라돈 저장 도료에 대해 각 3개(총 45개)의 실험 시편을 준비하였다. 또한, 도료제 시공 차이를 최소화하기 위해 [그림 3-6]과 같이 동일 전문가(도공)가 동일 도포방법 사용하였다.



[그림 3-5] 라돈저감도료 도장 작업 전



[그림 3-6] 라돈저감도료 도장 작업

다음의 [그림 3-7]과 같이 라돈 저감 도료 도포 후, 48시간 이상 경과된 시편을 대상으로 성능평가를 수행하였다.



[그림 3-7] 실험시편 (라돈저감도료 도장 후)



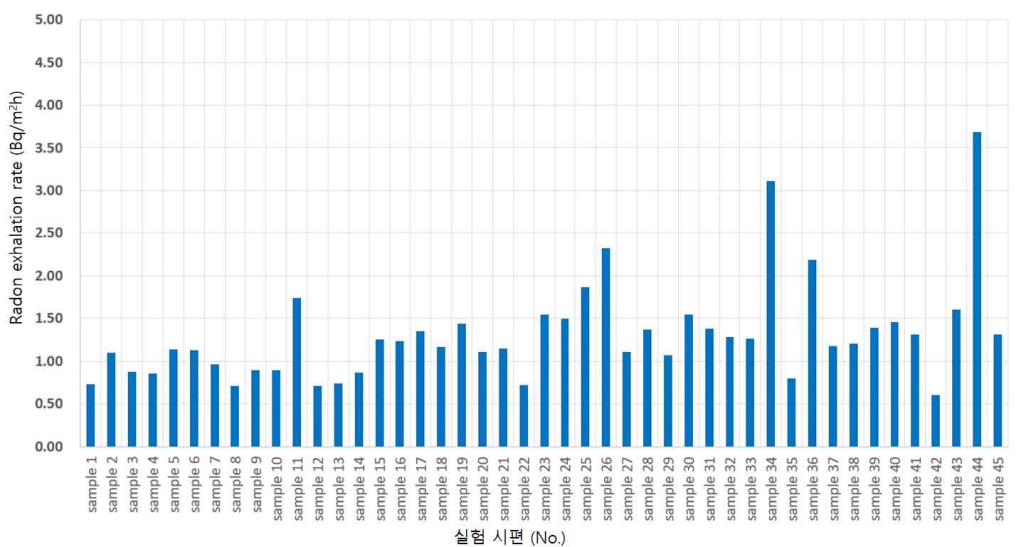
[그림 3-8] 실험시편 도료 도장

### 3. 실험 시편 표면 라돈 방출량 측정결과

#### 1) 라돈 저감 도료 적용 전 표면 라돈 방출량

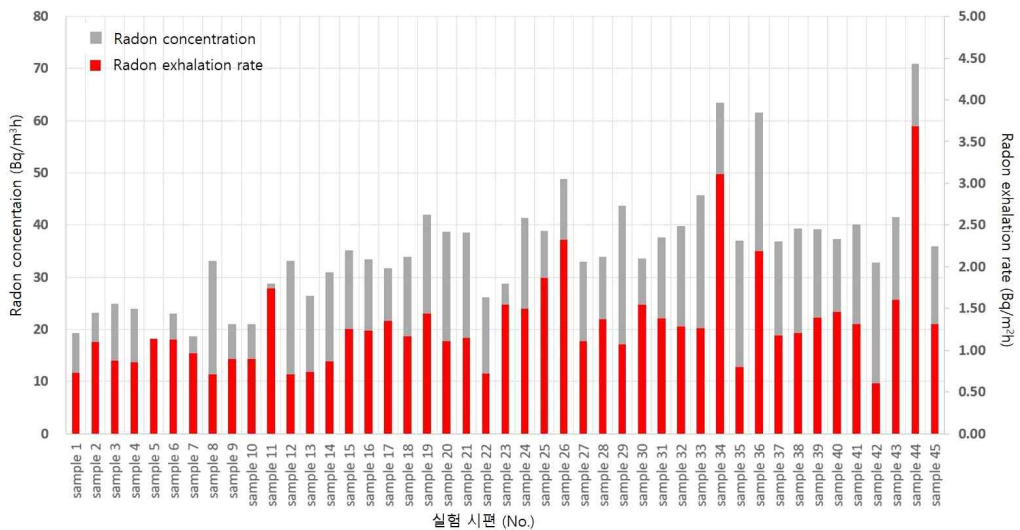
라돈 저감 도료 적용 전, 실험 시편의 라돈 방출량은 다음 [그림 3-9]와 같다.

일부 시편을 제외하고 실험 시편의 표면 라돈 방출량은 대체적으로 1.5 Bq/m<sup>2</sup>h 이하로 나타났다.



[그림 3-9] 표준시편 표면 라돈 방출량 (라돈저감도료 도장 전)

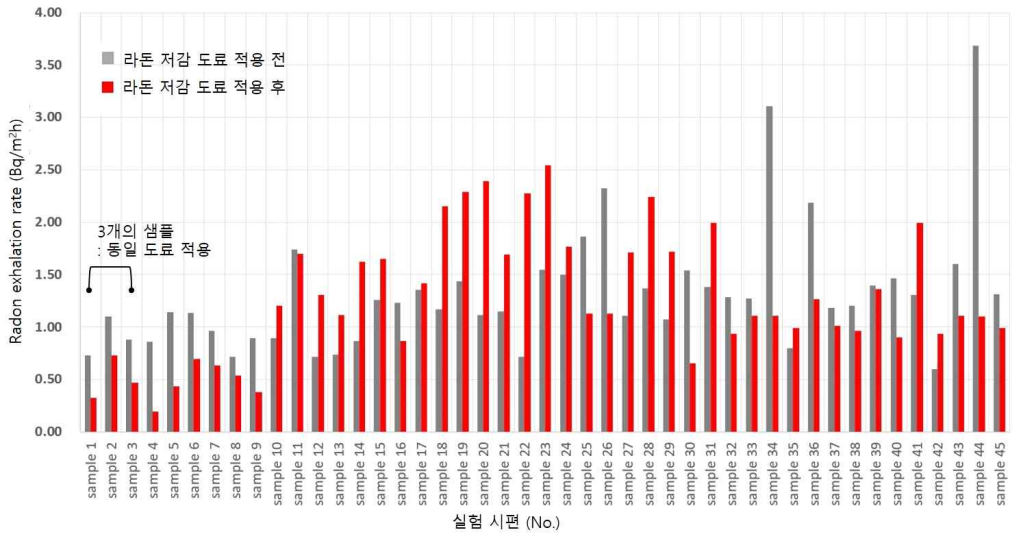
실험 시편의 표면 라돈 방출량 및 챔버 내 라돈 농도 측정 결과를 살펴보면, 라돈 저감 도료 적용 전, 실험 시편의 라돈 방출량이 높을수록 챔버 내 라돈 농도 또한 높은 경향을 보였다.



[그림 3-10] 표준시편 라돈 방출량 및 표면 라돈 방출량 (라돈저감도료 도장 전)

## 2) 라돈 저감 도료 적용 전/후 표면 라돈 방출량 비교

라돈 저감 도료 적용 전/후의 실험 시편의 표면 라돈 방출량 비교 결과, 25개 시편에서 약 2% ~ 77% 까지 라돈 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 일부 도료의 경우, 실험 시편에 적용 후 표면 라돈 방출량이 증가하였다(총 8종 제품, 약 18개 샘플).



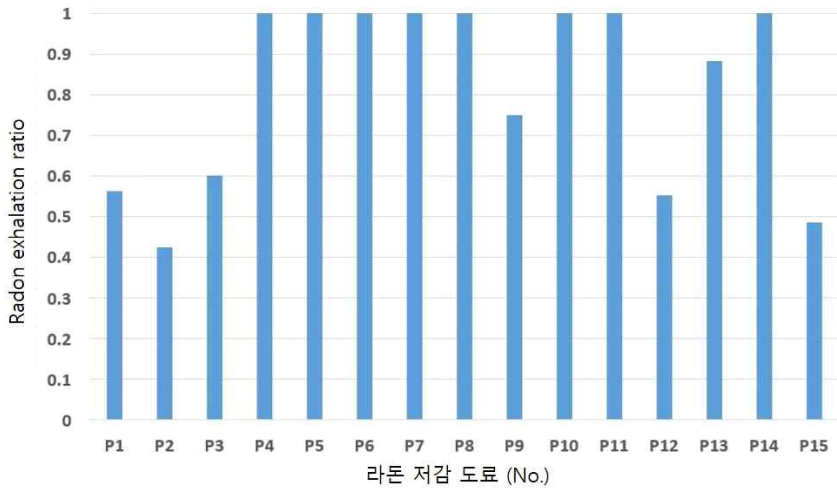
[그림 3-11] 표준시편 표면 라돈 방출량 (라돈저감도료 도장 전/후)

### 3) 도료별 표면 라돈 방출량 측정 결과

실험 결과의 신뢰성 확보를 위해 1종의 도료마다 3개의 실험 시편을 제작하였으며, 라돈 저감 도료별 성능을 비교하기 위해 도료 적용 전/후의 농도 비율을 활용하였다.

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

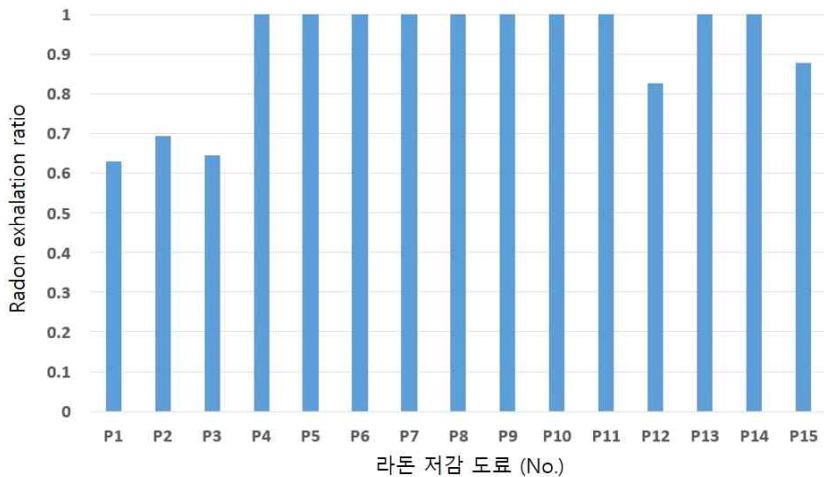
15종 도료의 평균 표면 라돈 방출량 측정을 비교한 결과, 총 7종의 시료에서 약 12~58 %의 라돈 저감 효과가 나타났다. 반면, 총 8종의 시료에서 라돈 저감 효과가 나타나지 않았다.



[그림 3-12] 실험시편 표면 라돈 방출량 (라돈저감도료 도장 전/후 비율)

#### 4) 도료 별 실내(챔버 내) 라돈 농도 측정 결과

15종 도료의 실내(챔버 내) 라돈 농도 측정을 비교한 결과, 총 5종의 시료에서 약 12~38 %의 실내 라돈 농도 저감 효과가 나타났다. 총 10종의 시료에서 실내 라돈 농도 저감 효과가 나타나지 않았다.



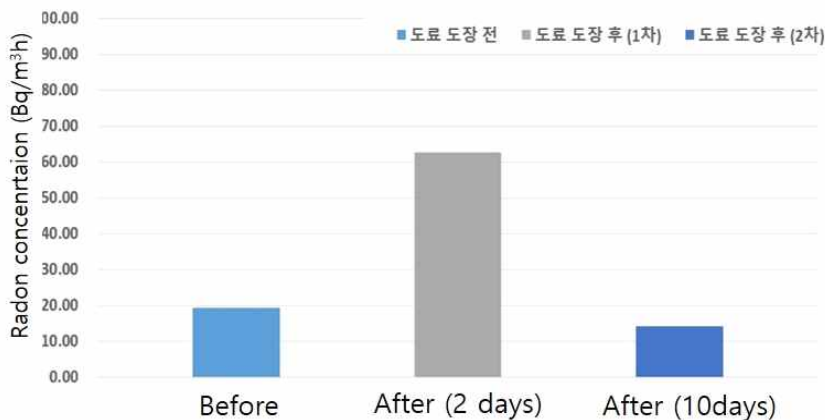
[그림 3-13] 실험시편 표면 라돈 방출량 (라돈저감도료 도장 전/후 비율)

#### 4. 라돈 방출량 및 챔버 내 라돈 농도 측정 결과 분석

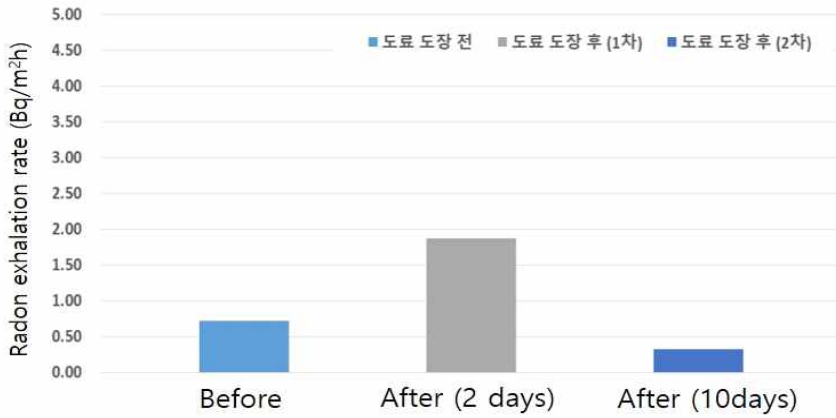
라돈 저감 도료 적용 후, 2일 및 10일 경과된 시편에 대한 측정을 수행하였다. 라돈 저감 도료 적용 직후, 챔버 내 라돈 농도 및 실험 시편의 표면 라돈 방출량 모두 증가하였다. 기존 출시제품 3개 중 1번 도료(P1)를 살펴보면, 도장 적용 10일 경과 후, 약 55% 정도 표면 라돈 방출 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 챔버 내 라돈 농도는 약 25% 감소하였으며, 챔버 내 초기 라돈 농도에 따라 실내 농도 저감 효과 차이 발생하는 것으로 판단된다.

[표 3-2] 라돈저감 도료 마감 후 측정결과(Sample 1)

구분	도료 도장 전	도료 도장 후 (1차)	도료 도장 후 (2차)
실내(챔버 내) 라돈 농도 [Bq/m <sup>3</sup> h]	19.36	62.79	14.37
STDEVA(실내 라돈 농도)	4.97	11.22	5.26
Radon exhalation rate [Bq/m <sup>2</sup> h]	0.73	1.88	0.33

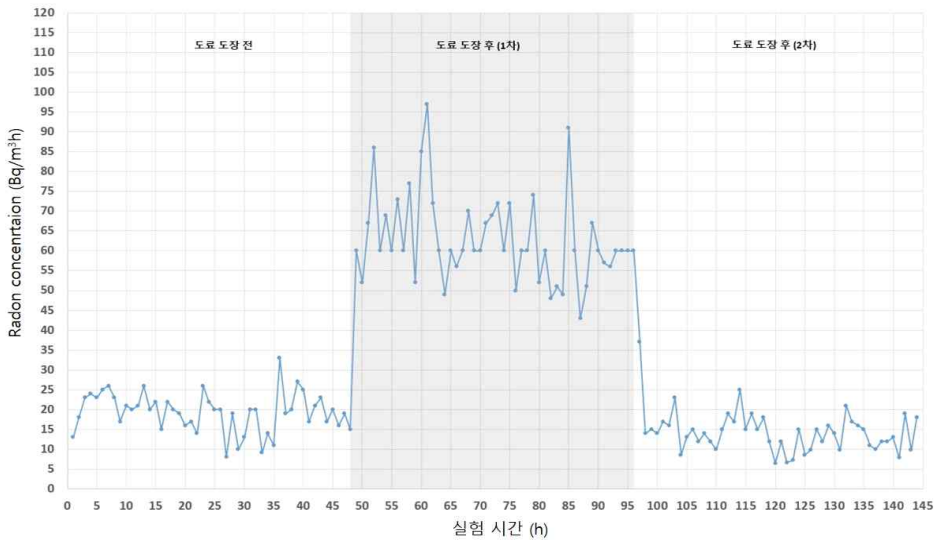


[그림 3-14] 라돈저감 도료 적용 후 실내 라돈 농도 (Sample 1)



[그림 3-15] 라돈저감 도료 적용 후 표면 라돈 방출량 (Sample 1)

라돈 저감 도료 적용 전보다 도료 도장 후, 실험 시편의 표면 라돈 방출량이 증가하였다. 수성 도료 사용으로 실험 시편 표면 습도 증가가 원인으로 추정된다. 도료 경화가 충분히 이루어진 후, 실험 시편의 표면 라돈 방출량이 감소하는 경향을 나타내었다.

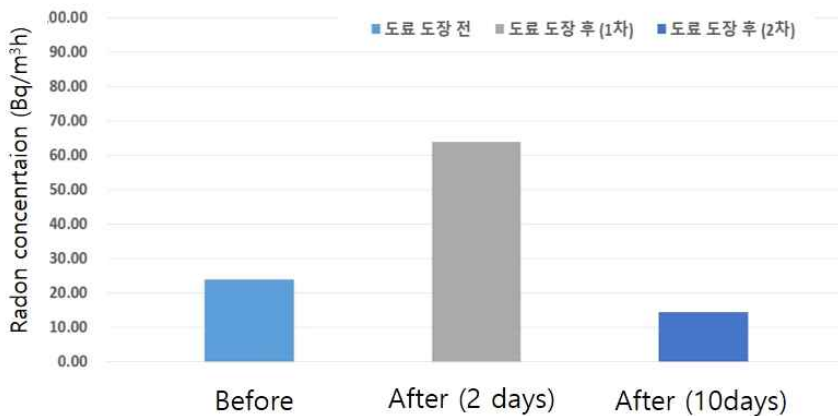


[그림 3-16] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 1)

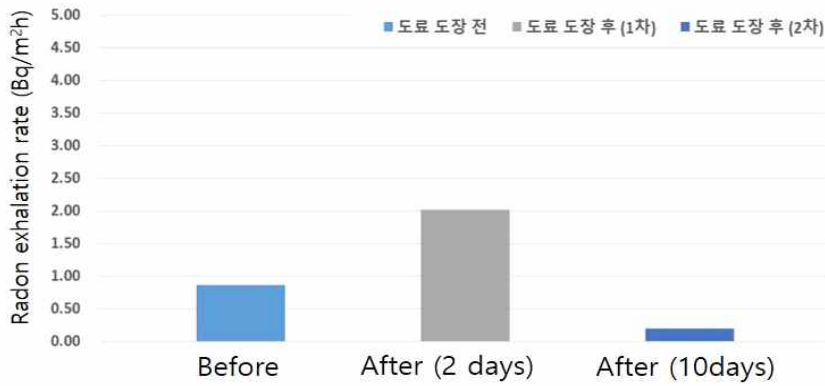
기존 출시제품 3개 중 2번 도료(P2) 적용 10일 경과 후, 약 77% 정도 표면 라돈 방출 저감 효과가 있는 것으로 나타났으며, 챔버 내 라돈 농도는 약 40% 감소한 것으로 나타났다.

[표 3-3] 라돈저감 도료 마감 후 측정결과(Sample 2)

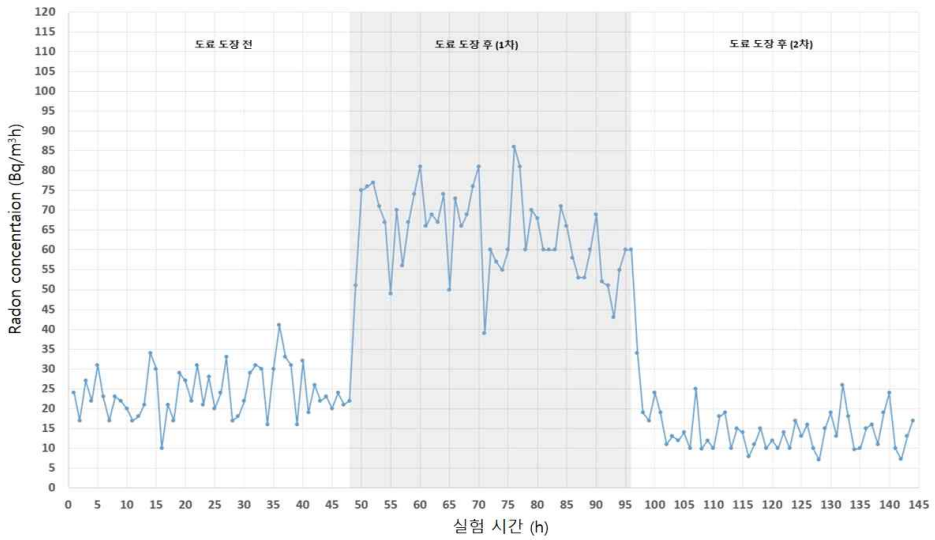
구분	도료 도장 전	도료 도장 후 (1차)	도료 도장 후 (2차)
실내(챔버 내) 라돈 농도 [Bq/m <sup>3</sup> h]	24.00	64.00	14.62
STDEVA(실내 라돈 농도)	6.16	10.49	5.45
Radon exhalation rate [Bq/m <sup>2</sup> h]	0.86	2.01	0.20



[그림 3-17] 라돈저감 도료 적용 후 실내 라돈 농도 (Sample 4)



[그림 3-18] 라돈저감 도료 적용 후 표면 라돈 방출량 (Sample 4)

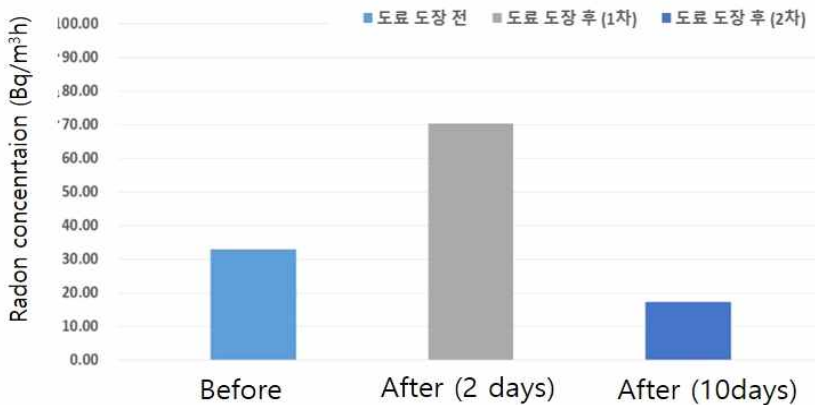


[그림 3-19] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 4)

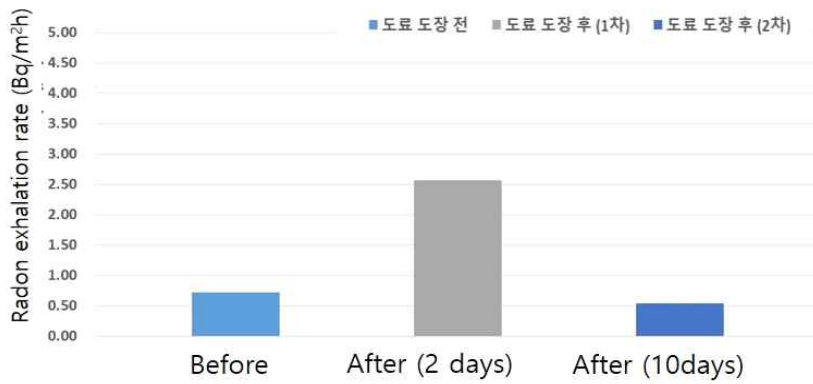
기존 출시제품 3개 중 3번 도료(P3) 적용 10일 경과 후, 약 25% 정도 표면 라돈 방출 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 챔버 내 라돈 농도는 약 48% 감소한 것으로 나타났다.

[표 3-4] 라돈저감 도료 마감 후 측정결과(Sample 8)

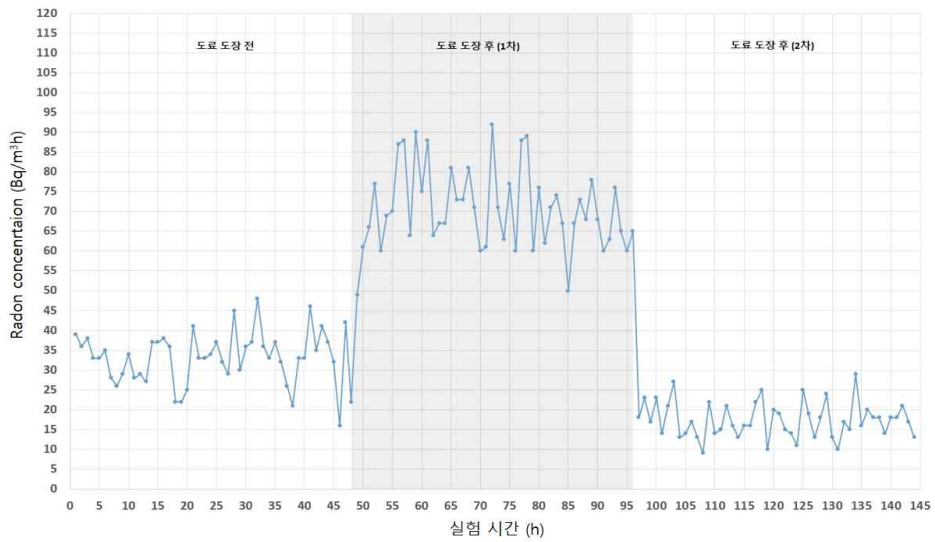
구분	도료 도장 전	도료 도장 후 (1차)	도료 도장 후 (2차)
실내(챔버 내) 라돈 농도 [Bq/m <sup>3</sup> h]	33.10	70.52	17.38
STDEVA(실내 라돈 농도)	6.65	10.30	4.55
Radon exhalation rate [Bq/m <sup>2</sup> h]	0.72	2.57	0.54



[그림 3-20] 라돈저감 도료 적용 후 실내 라돈 농도 (Sample 8)



[그림 3-21] 라돈저감 도료 적용 후 표면 라돈 방출량 (Sample 8)



[그림 3-22] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 8)

실험 시편 측정 결과, 라돈 저감 효과를 기대할 수 있는 도료는 총 7종이다. 이 도료들의 공통점은 도막의 탄성력이 우수해 크랙저항성이 높으며, 부착성이 뛰어나다는 특징이 있다. 또한 도막 자체의 기체 투과율이 낮아 라돈 투과에 대한 저항성을 높인 것으로 추정된다. 다만 도료 자체가 수성이기 때문에 적용 시, 시공 직후 표면 라돈 방출량은 증가할 수 있다.

[표 3-5] 라돈 저감 효과 도료 및 특징

번호	제조사	구분	제품명	특징
1	A	출시	Sample 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>●에멀전 성분으로 치밀한 도막 형성</li> <li>●도막의 탄성으로 미세한 크랙 발생 억제, 라돈차폐</li> </ul>
2	B	출시	Sample 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>●기능성 고탄성 수지를 이용 라돈 차폐</li> <li>●PG 및 조용제 사용하지 않아 유해물질 방출 최소화</li> </ul>
3	C	출시	Sample 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>●수용성 아크릴수지를 적용해 부착성과유해물질 저감 도료</li> <li>●다용도 부착성 우수 제품</li> </ul>
9	A	개발	Sample 9	<ul style="list-style-type: none"> <li>●저온(-20℃)에서 도막 형성시 탄성 유지, 치밀한 도막 형성</li> <li>●건축자재의 크랙저항성 높음, 라돈차폐</li> </ul>
12	B	개발	Sample 12	<ul style="list-style-type: none"> <li>●특수 비닐수지계 에멀전 제품</li> <li>●기체 투과율이 낮은 수지를 사용하여 제조</li> </ul>
13	B	개발	Sample 13	<ul style="list-style-type: none"> <li>●특수 비닐수지계 에멀전 제품</li> <li>●판상 형태의 안료를 사용하여 기체 투과를 최소화</li> </ul>
15	B	개발	Sample 15	<ul style="list-style-type: none"> <li>●수용성아크릴을 주성분으로 한 수용성 락카(DIY용)</li> <li>●건조시간이 빠르고 투명성, 작업성이 우수</li> </ul>

## 5. 실증 주택 활용 라돈 저감자재 적용 평가

### 1) 라돈 저감 도료 적용 전/후 표면 라돈 방출량 비교

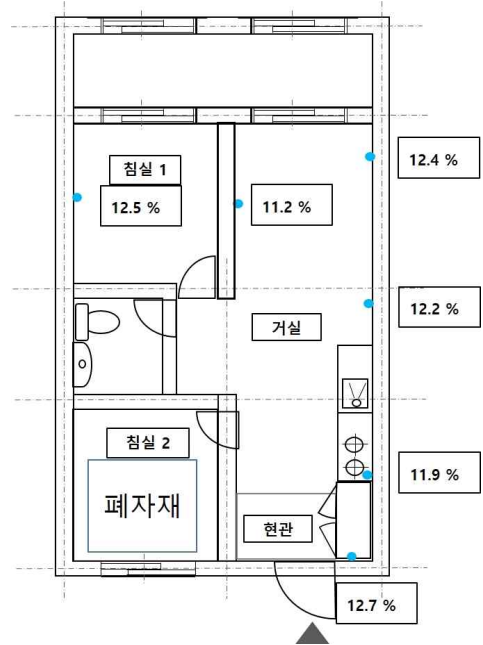
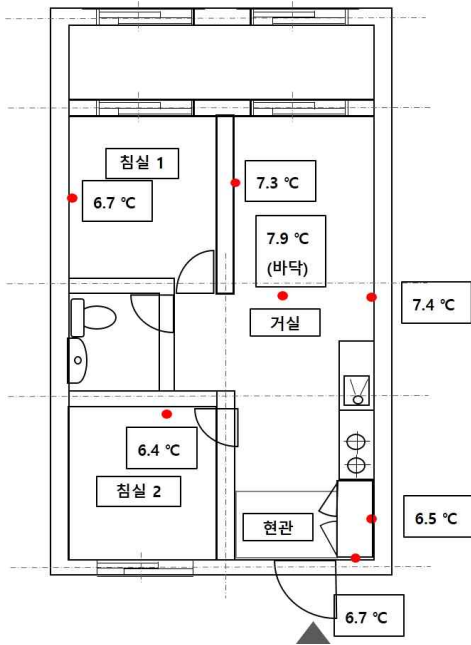
라돈 저감 도료 적용 전/후 표면 라돈 방출량 비교하기 위하여 LH 토지주택연구원 내 실증주택(벽식 구조)을 대상으로 측정을 수행하였다. 대상 세대는 46m<sup>2</sup> type의 일반적인 공동주택 평면을 가지며, 또한, 저감 도료 적용에 따른 세대 차이를 비교하기 위하여 실증세대 2세대를 대상으로 실험을 수행하였다. 실험기간은 194시간(8일, 도장 전 52시간 및 도장 후 141시간)동안 측정하였다. 라돈 저감 효과가 있는 도료 중 구매가 용이하고 공동주택 실내 적용이 가능한 도료로 한정하여 도료를 선정하였으며, 비용(소비자가 약 10,000원/L)과 저감 효과(약 38% 저감)를 고려한 도료 1종(P1)으로 실험을 진행하였다. 다음의 [그림 3-23] 및 [그림 3-24]는 실증세대 내부의 도료 적용 전후의 측정 모습을 나타낸 것이다.



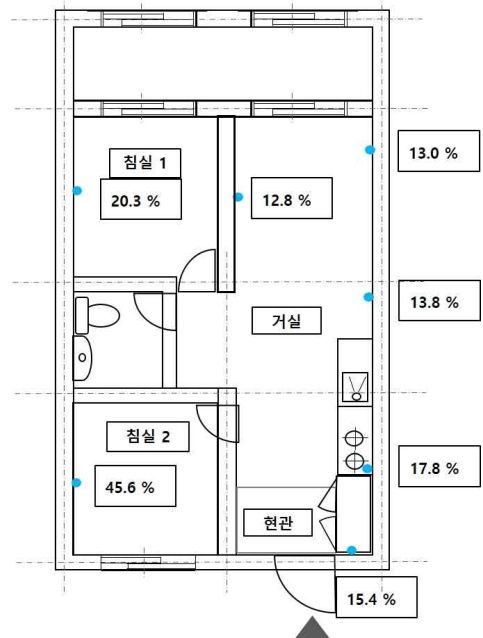
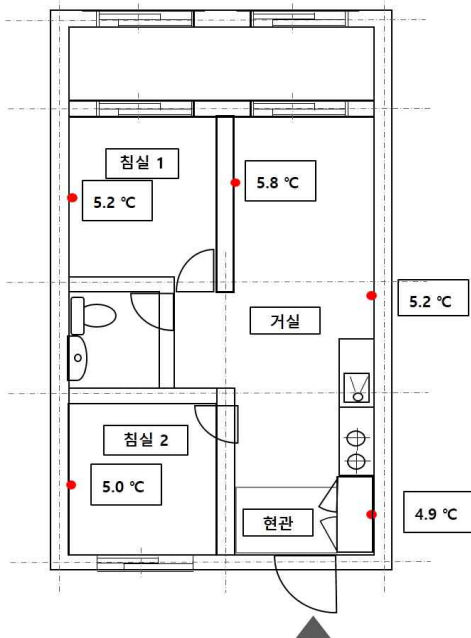
[그림 3-23] 실증주택 도료 적용 전 실내 라돈 농도 측정



[그림 3-24] 실증주택 도료 시공 및 실내 라돈 농도 측정

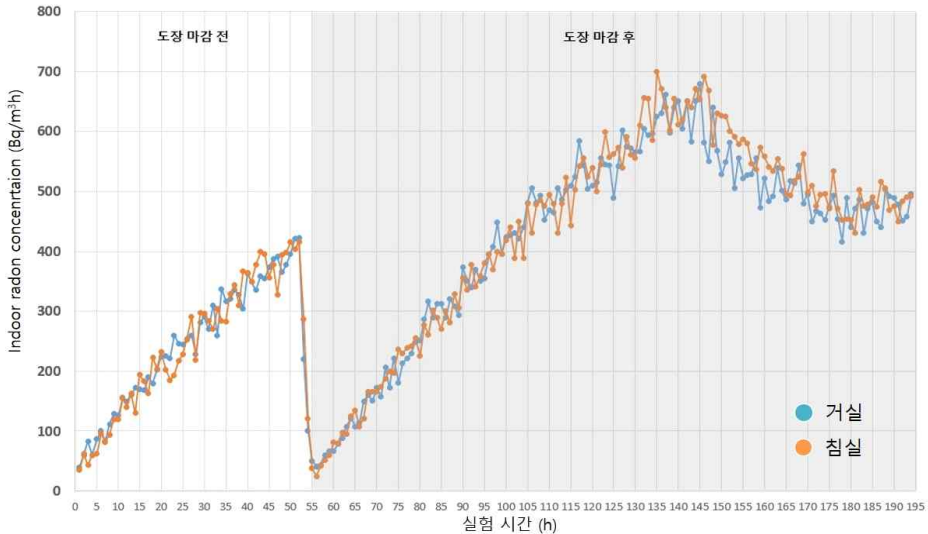


[그림 3-25] 세대 벽 표면온도 측정(1층) [그림 3-26] 세대 벽 표면습도 측정(1층)



[그림 3-27] 세대 벽 표면온도 측정(2층) [그림 3-28] 세대 벽 표면습도 측정(2층)

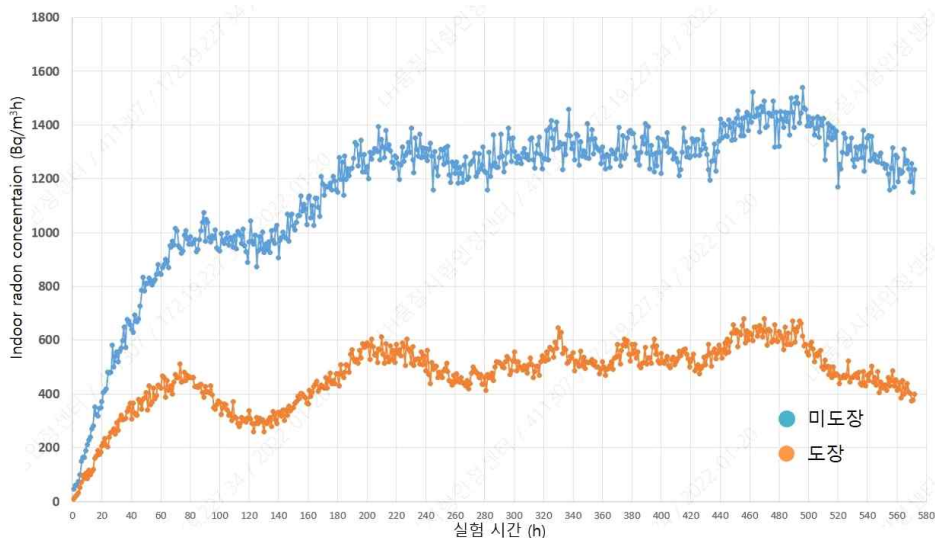
라돈 저감 도료 적용 전/후에 따른 실내 라돈 농도 변화는 다음 [그림 3-29]와 같다. 도료 적용 전, 실내 라돈 농도는 증가하는 추세를 보였으며, 도료 적용 직후 실내 라돈 농도는 도료 적용 전과 유사한 속도로 증가하였다. 도료 적용 약 80시간 (3.3일) 경과 후부터 실내 라돈 농도가 감소하기 시작하였다.



[그림 3-29] 라돈 저감 도료 전/후에 따른 실내 라돈 농도 비교

라돈 저감 도료 적용 전, 실내 라돈 농도 변화에 대한 추이를 살펴보면, 방사평형이 이루어지기 전까지 일정한 속도로 실내 라돈 농도가 증가하였다 ( $R^2=0.9$  이상).

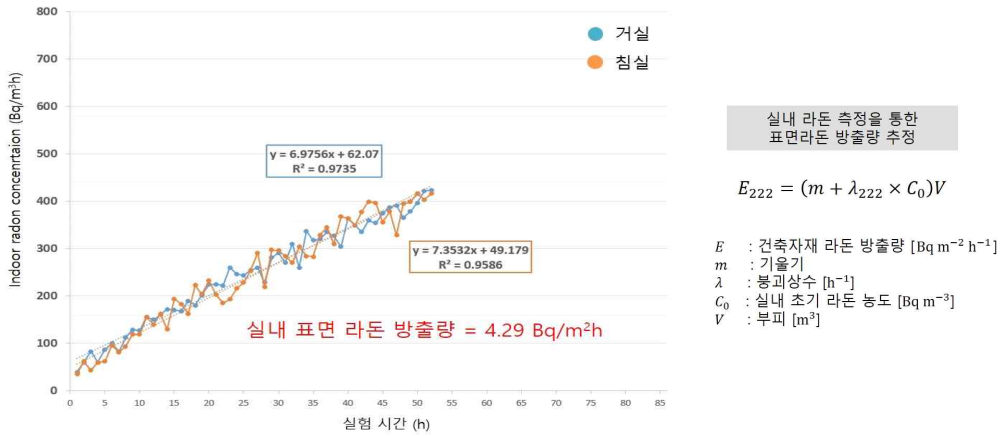
이는 외부 환경 변화가 거의 없고(침기량 일정), 실내 표면 라돈 방출량이 거의 일정함을 의미한다. 본 측정은 2일 간 수행하였으며, 방사평형 확인을 위해서 장기 측정을 추가로 수행하였다. 장기 측정은 25일간 측정하였으며 측정결과에 대한 그래프는 다음의 [그림 3-30]과 같다.



[그림 3-30] 라돈 저감 도료 적용 유무에 따른 실내 라돈 농도 비교

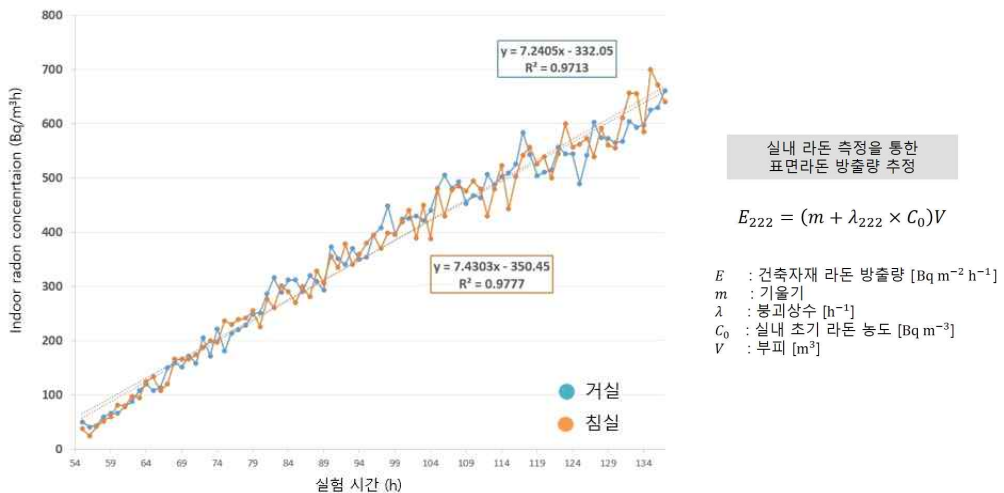
라돈 저감 도료 적용 유무에 따른 실내 라돈 농도 변화에 대한 추이를 살펴보면 라돈 저감 도료를 사용하지 않은 세대의 실내 라돈 농도가 라돈 저감 도료를 사용한 세대의 실내 라돈 농도에 비해 빠르게 상승하는 것을 볼 수 있다. 실험 측정 약 60 시간 경과 후 실내 라돈 농도를 비교해보면 라돈 저감 도료 적용 전 실내 라돈 농도는 약 800 Bq/m<sup>3</sup>h임에 반해 라돈 저감 도료 적용 후 실내 라돈 농도는 약 400 Bq/m<sup>3</sup>h이다. 이는 대상 세대의 환경 조건이 동일하다는 가정 하에, 라돈 저감 도료가 실내 건축자재 표면에서 발생하는 라돈 방출량을 저감시키기 때문으로 추정한다.

또한 실내의 환경 변화가 없는 정상 상태에서의 라돈 저감 도료 효과를 확인하기 위해 실내 라돈 농도가 방사평형을 이룬 상태에서의 각 측정값을 비교하였다. 본 실험에서는 약 10일(240 시간 이상) 경과 후 실내 라돈 농도가 방사평형을 이루는 것으로 확인하였다. 방사평형이 형성된 시점 이후의 실내 라돈 농도를 비교하였을 때, 도료 미적용 시 평균 1319 Bq/m<sup>3</sup>h과 도료 적용 시 평균 522 Bq/m<sup>3</sup>h로 약 60% 차이가 발생하였다. 본 실험 결과는 외부 환경조건이 겨울철이며, 실내에는 별도의 마감 또는 열원이 존재하지 않는 조건에서 측정에 한정한다.



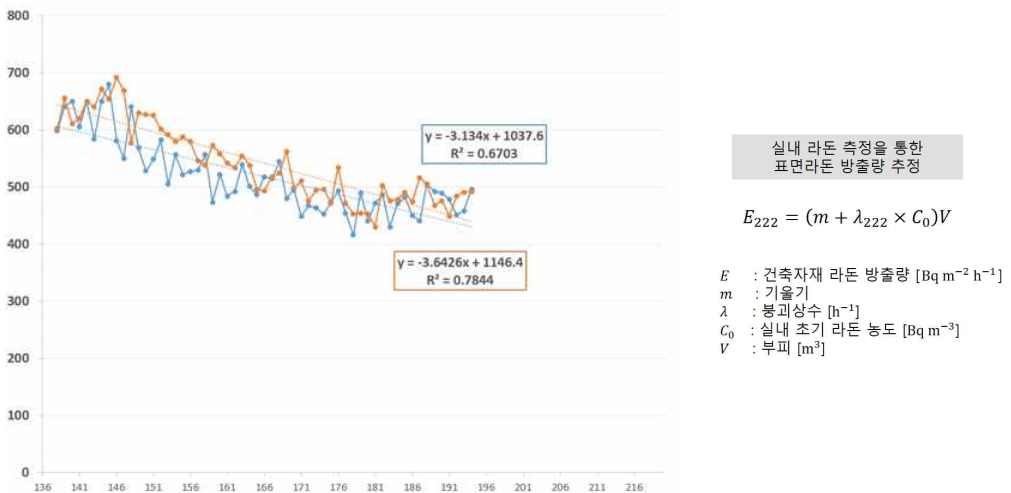
[그림 3-31] 라돈 저감 도료 전, 실내 라돈 농도 변화

라돈 저감 도료 적용 직후, 실내 라돈 농도 변화에 대한 추이를 살펴보면, 라돈 저감 도료 적용 전보다 빠른 속도로 실내 라돈 농도가 증가하였다. 라돈 저감 도료 사용으로 실내 표면 습도가 높아져 실내 표면 라돈 방출량이 4.44 Bq/m<sup>2</sup>h(도장 전과 비교 시, 약 4% 증가)이 증가한 것으로 추정된다. 실내 라돈 농도 증가 속도가 감소하는 현상 확인을 위해 장기 측정(4일 이상)이 필요할 것으로 사료된다.



[그림 3-32] 라돈저감 도료 적용 직후, 실내 라돈 농도 변화

라돈 저감 도료 적용 후, 실내 라돈 농도 변화에 대한 추이를 살펴보면, 라돈 저감 도료 적용 전에 비해 실내 라돈 농도가 약 30% 감소하였다. 경과 시간에 따라 실내 라돈 농도 감소 추세(기울기)가 변화하는 것으로 추정된다. 라돈 저감 도료 적용 후, 실내 표면 라돈 방출량이 3.08 Bq/m<sup>2</sup>h로 감소하여 (도장 전, 실내 표면 라돈 방출량 = 4.29 Bq/m<sup>2</sup>h) 실내 라돈 농도도 함께 감소하는 패턴을 보이다 일정 시간 후, 방사 평형이 형성되는 것으로 나타났다.



[그림 3-33] 라돈저감 도료 적용 후, 실내 라돈 농도 변화



## 제 4 장 결 론

LAND INSTITUTE  
LAND INSTITUTE  
LAND INSTITUTE



## 제4장 결 론

국내 공동주택은 콘크리트 벽식구조의 특성으로 무기질 건축자재의 사용량이 많아 정부 조사결과에 따르면 권고기준 초과가 예상되어 민원 등 분쟁발생이 우려되고 있다. LH는 실내 라돈 저감을 목표로 건축자재 사전 관리 기준을 신설하였고 국토부, 환경부 다부처 중심의 천연 석재 기반의 라돈 관리 지침을 수립하였으나 실내 라돈 농도 제어에는 한계가 있다.

실내라돈을 저감시키기 위한 가장 효과적인 방법은 오염원 제어로서 라돈을 방출하는 건축자재 사용을 줄이거나 대체자재를 활용하여야 한다. 따라서, 사전 자재관리만으로 실내 라돈농도 제어에 한계가 있으므로 다양한 자재유형 및 환기 등 환경여건을 검토하여 콘크리트 등 자재의 라돈 저감이 가능한 피막도포제 및 차폐재 등을 적용하여 무기질 건축자재에서 방출되는 오염물질을 줄이는 방안 및 상시환기 등을 활용한 라돈저감 등과 같은 대책마련이 필요하다.

본 연구에서는 콘크리트 등 건축자재에 라돈 저감이 가능한 도포제 및 차폐재 등을 적용하여 무기질 건축 자재에서 방출되는 라돈 감소 효과를 분석을 바탕으로 사후 관리를 통한 실내 표면 라돈 방출 저감을 목적으로 하였다.

본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 실험 시편(화강암)을 대상으로 15종의 라돈 저감 도료 성능 평가를 수행하였음, 측정 결과, 총 7종의 시료에서 약 12~58 %의 라돈 저감 효과가 나타남
- 표면 라돈 방출량이 적을수록 실내 라돈 농도는 낮아질 수 있으나 정비례하지 않음
- 실내 라돈 농도의 경우, 표면 라돈 방출량 외 초기 라돈 농도 등의 영향을 받음
- 수성 도료의 특성으로 도료 적용 직후 표면 라돈 방출량이 증가하는 추세가 보임.
- 라돈 저감 도료 적용 시, 충분한 건조 시간 후에 표면 라돈 방출량 저감 효과가 나타남

- 라돈 저감 효과가 있는 도료는 공통적으로 도막의 탄성력이 우수해 기체 투과율이 낮아짐으로써 라돈 투과 저항성 및 크랙 저항성이 높음
- 실증 주택을 대상으로 라돈 저감 도료 시공 결과, 라돈 저감 도료 적용 전/후 실내 라돈 농도 비교 결과 약 30%, 표면 라돈 방출량 비교 결과 약 29%의 라돈 저감 효과가 나타남
- 라돈 저감 도료 사용 직후, 실내 표면 습도가 높아져 표면 라돈 방출량이 단기간 증가함
- 라돈 저감 도료의 성능 평가를 위해 충분한 건조시간이 지난 후의 실내 라돈 농도 측정이 필요함

## 참 고 문 헌

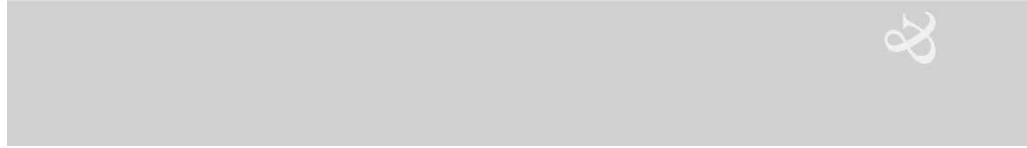
LAND INSTITUTE  
LAND INSTITUTE  
LAND INSTITUTE



## 참고문헌

- 박훈채, 최항석, 조승연, 김선홍(2014), “건축자재로부터 방출되는 라돈의 실내 확산에 대한 수치해석적 연구”, 『대한환경공학회지』, 36(5): 325~332.
- 조현, 방승기(2019), “마감재 및 환기를 고려한 공동주택 실내 라돈 농도의 비정상 해석”, 『한국지열에너지학회 논문집』, 15(4): 24~31.
- 한현각(2015), “수성페인트-실란접착제 혼합물의 접착특성”, 『한국산화기술학회 논문지』, 16(8): 5721~5727.
- 윤덕경, 정재원(2020), “실내외 온습도와 실내 라돈 농도를 이용한 실내 라돈 농도 예측 모형”, 『한국정보기술학회논문지』, 18(12) : 31~37.
- 정준식, 유주희, 이규선, 이재원, 심인근, 서수연, 김부옥, 권명희(2016), “우리나라 공공 건축물의 라돈 농도 특성과 유효선량 평가에 관한 연구”, 『한국생활환경학회지』, 23(6): 767~775.
- 김현주, 김진석, 이종만, 김달호(2020), “한국의 주거환경에서 실내공기 중 유해물질 저감에 미치는 환기의 영향”, 『한국분석과학회지』, 33(1): 58~65.
- 이병희, 김선동, 전주영(2021), “공동주택 실내 라돈 평가 및 관리”, 『한국건축친환경설비학회』, 15(1): 26~34.
- 이병희(2021), “안전한 실내 환경을 위한 건축자재의 라돈관리”, 『대한설비공학회』, 50(7): 64~71.
- Man, C.K., Yeung, H.S. (1999). “Modeling and measuring the indoor radon concentrations in high-rise buildings in Hong Kong”. Applied Radiation and Isotopes, 50, 1131-1135.
- Shaikh, A.N., Ramachandran, T.V., Kumar, A.V. (2003). “Monitoring and modelling of indoor radon concentrations in a multi-storey building at Mumbai”, India. Journal of Environmental Radioactivity, 67, 15 -26





&

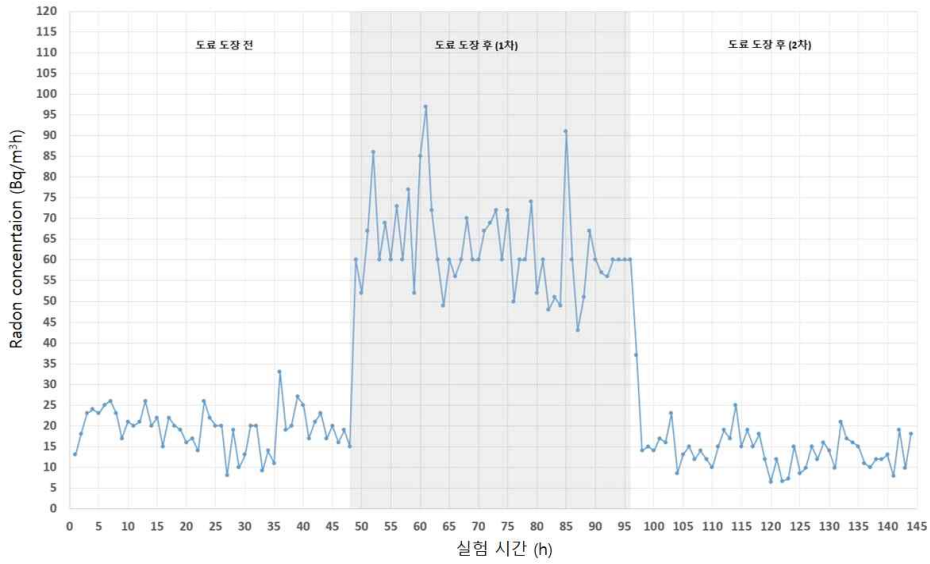
L	A	N	D			
H	O	U	S	I	N	G
I	N	S	T	I	T	U
						E

한  
글

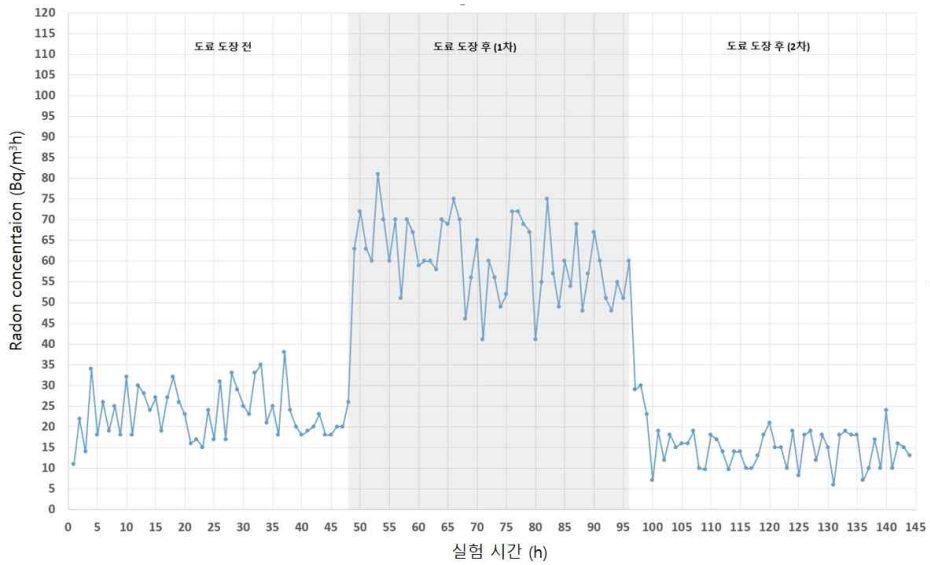




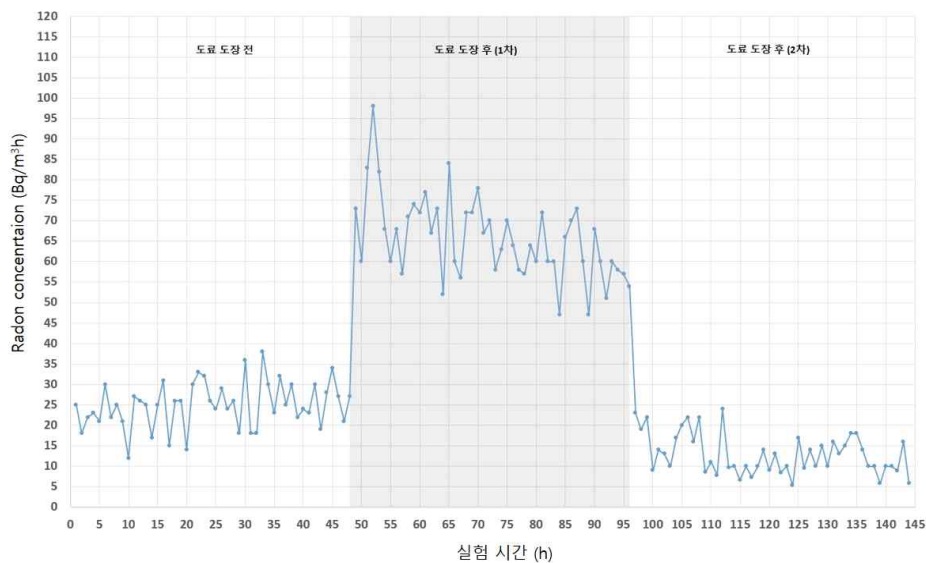
## 부 록



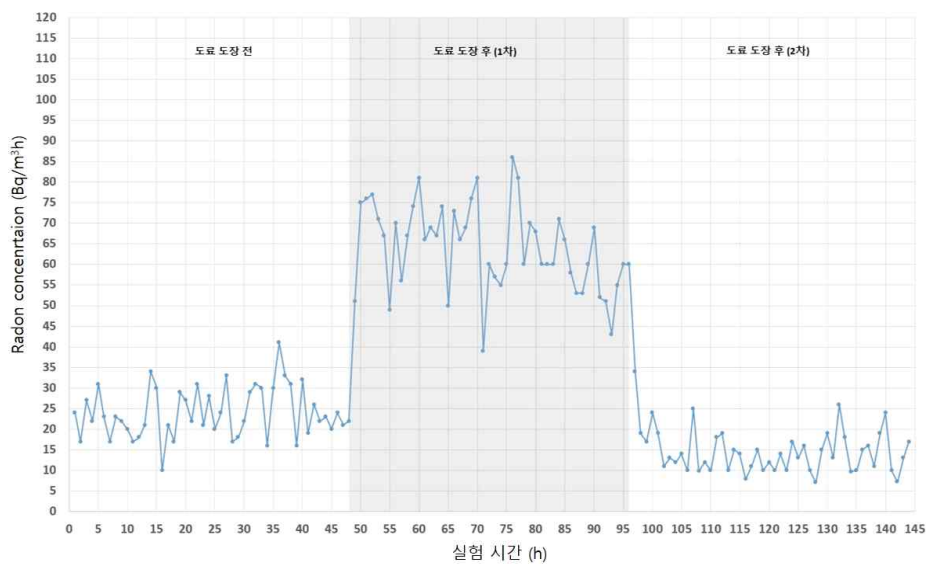
[그림 1] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 1)



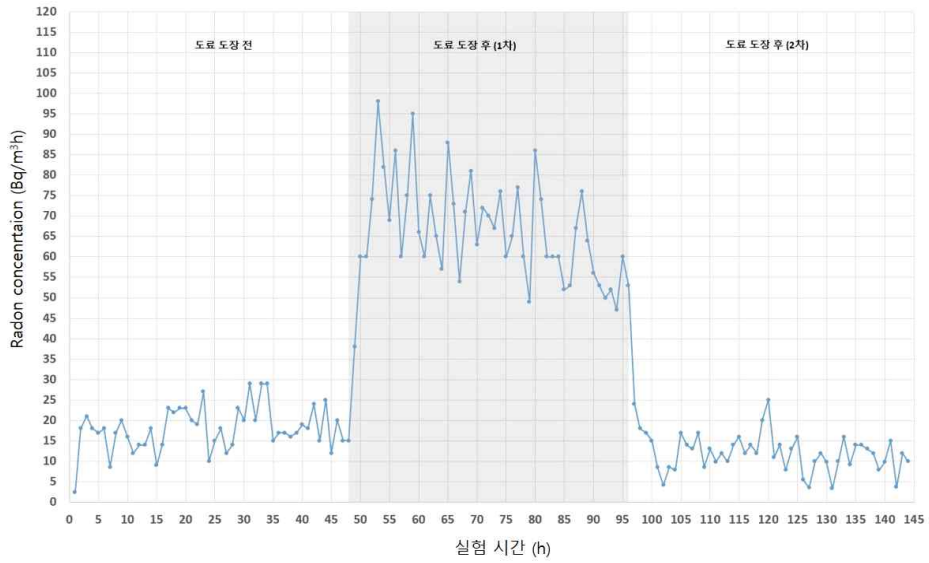
[그림 2] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 2)



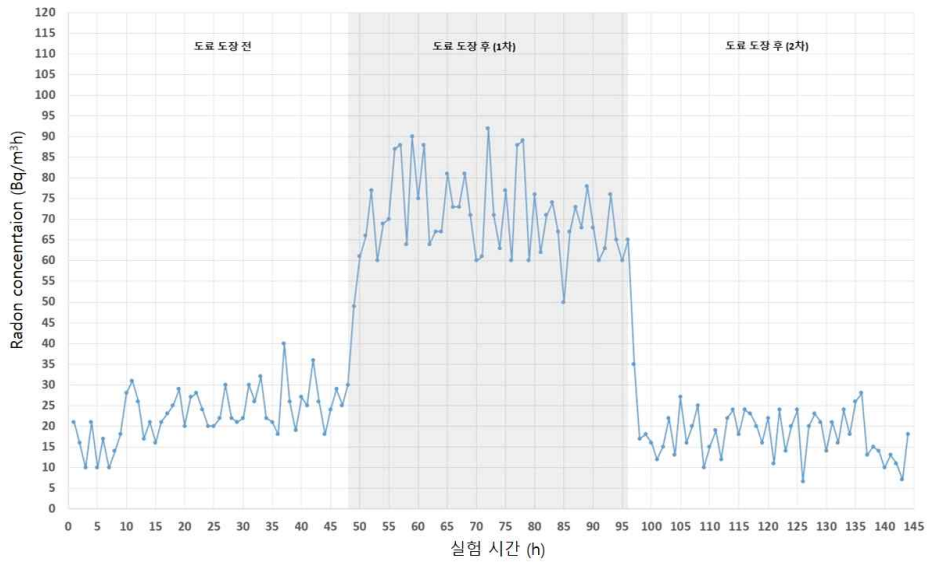
[그림 3] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 3)



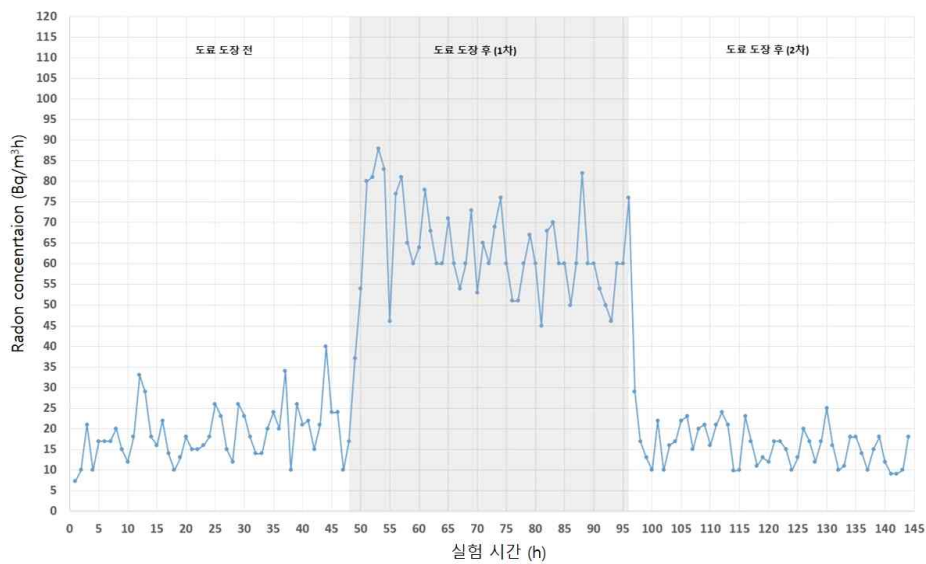
[그림 4] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 4)



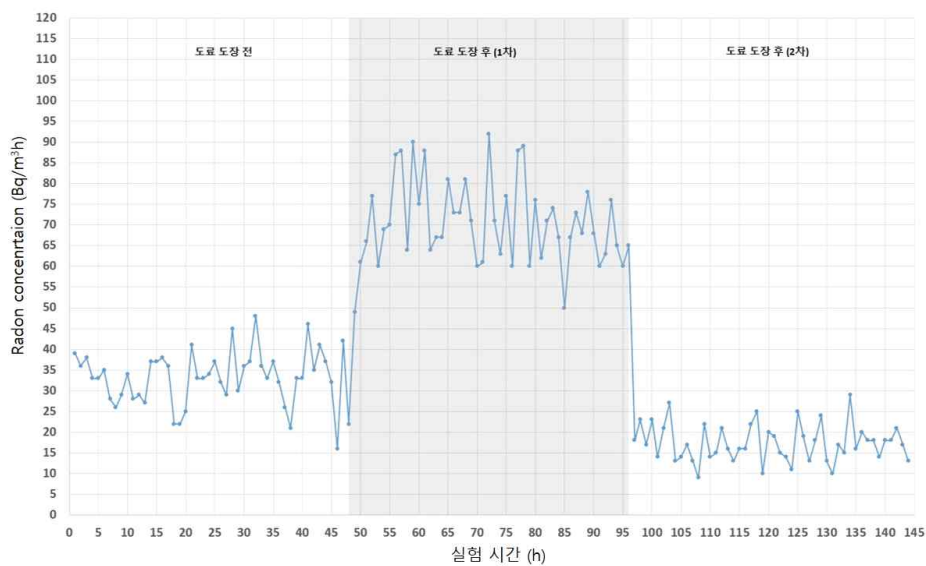
[그림 5] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 5)



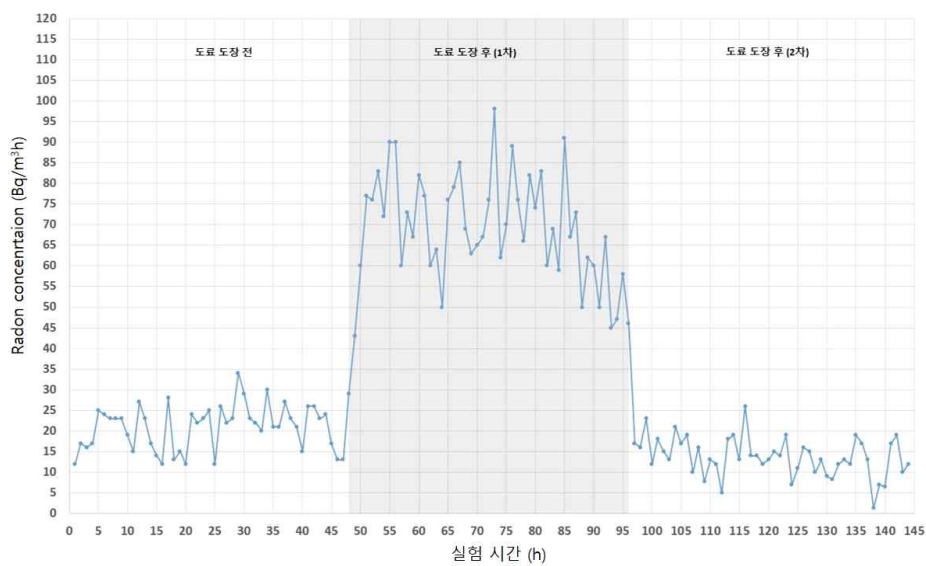
[그림 6] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 6)



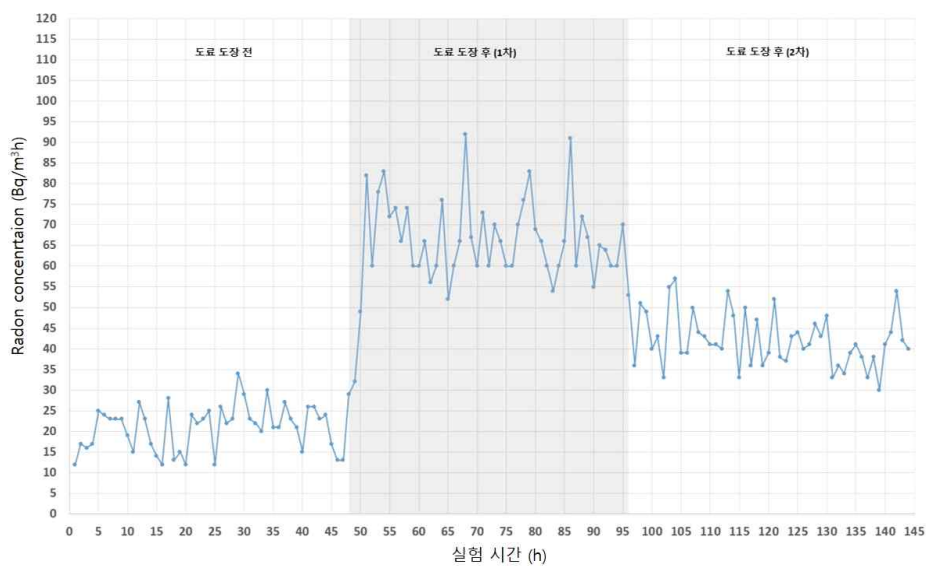
[그림 7] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 7)



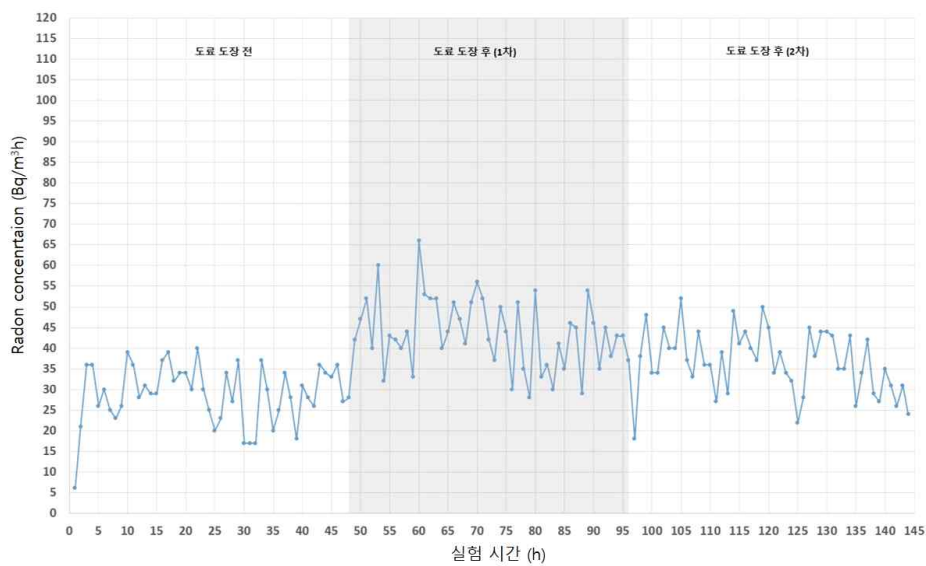
[그림 8] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 8)



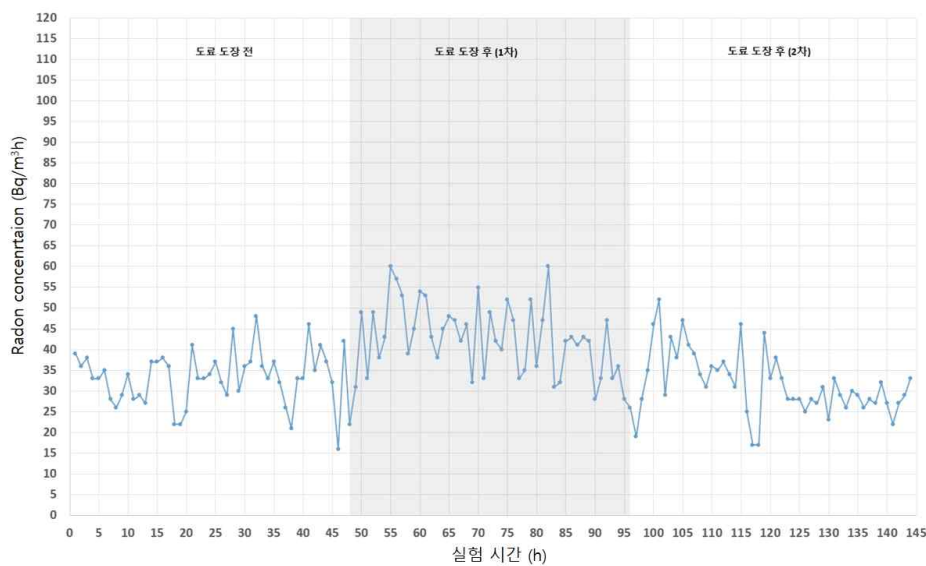
[그림 9]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 9)



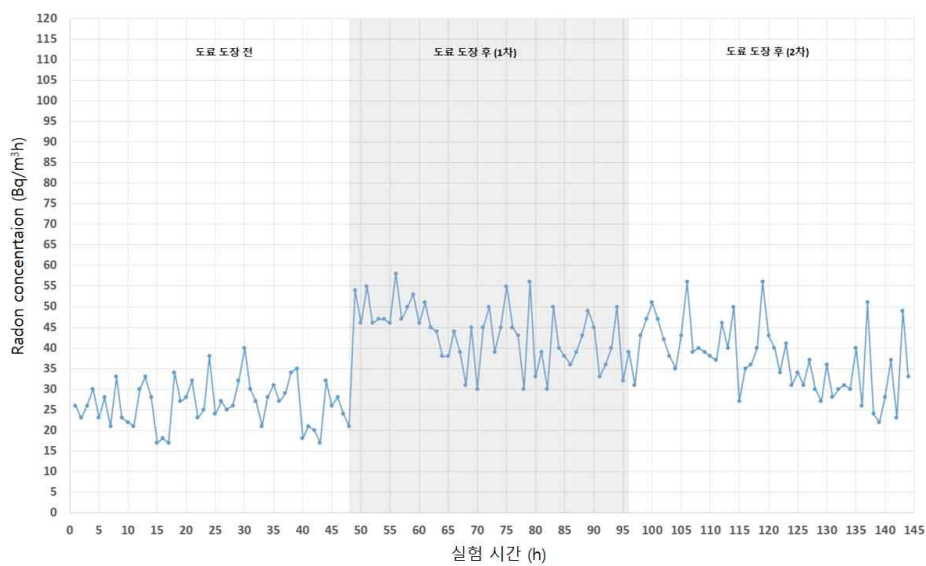
[그림 10]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 10)



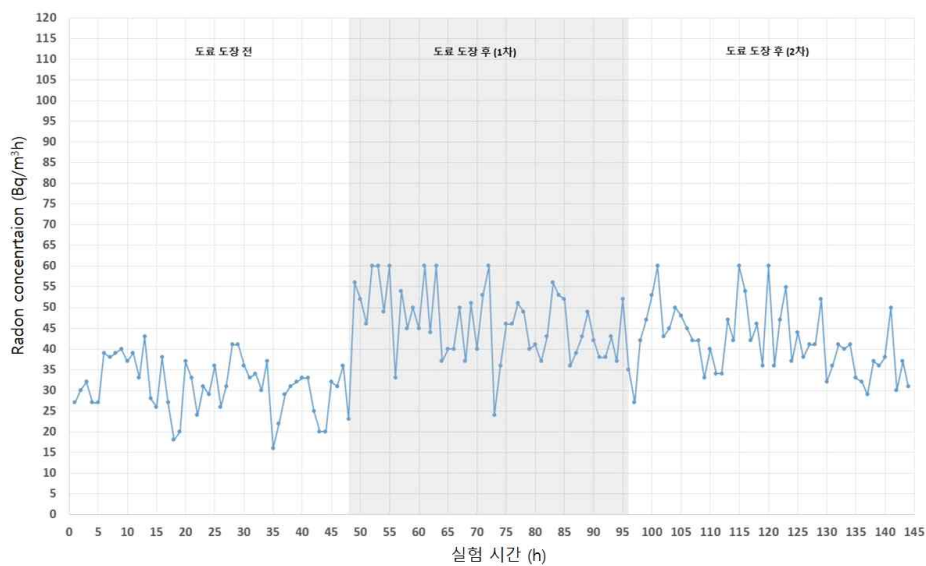
[그림 11]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 11)



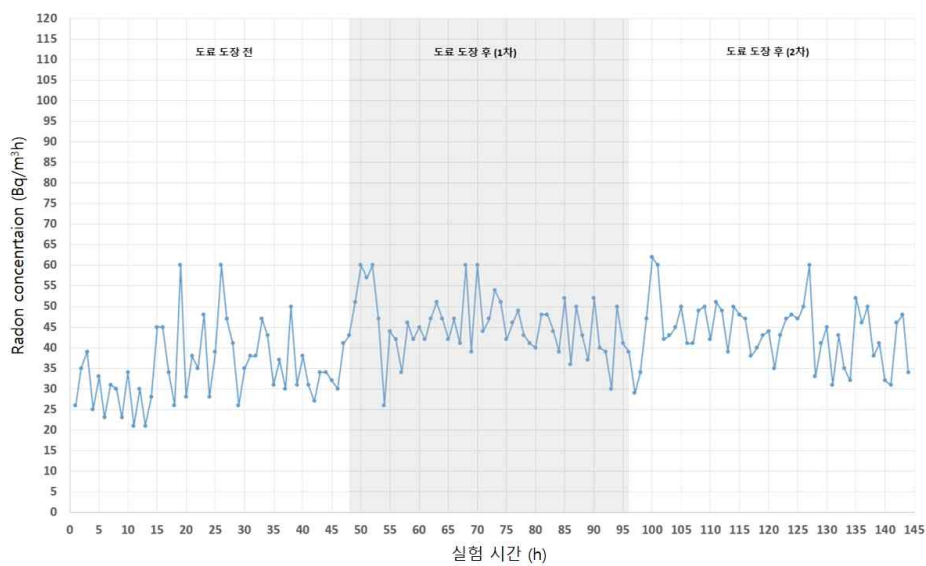
[그림 12]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 12)



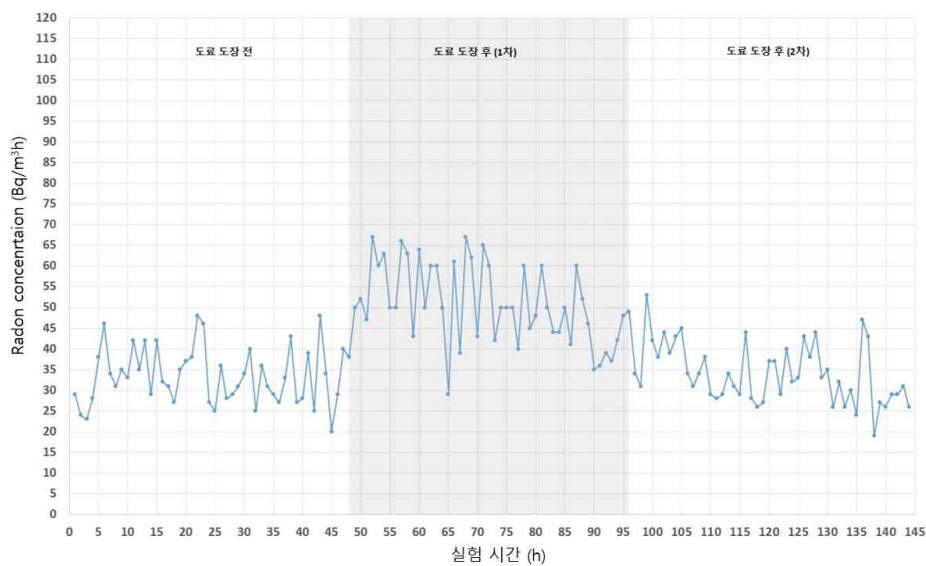
[그림 13]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 13)



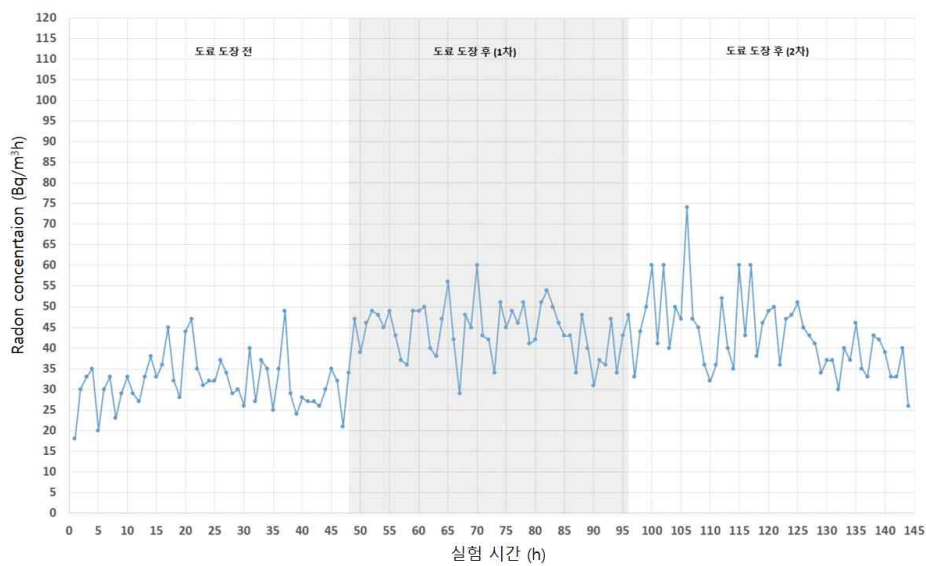
[그림 14]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 14)



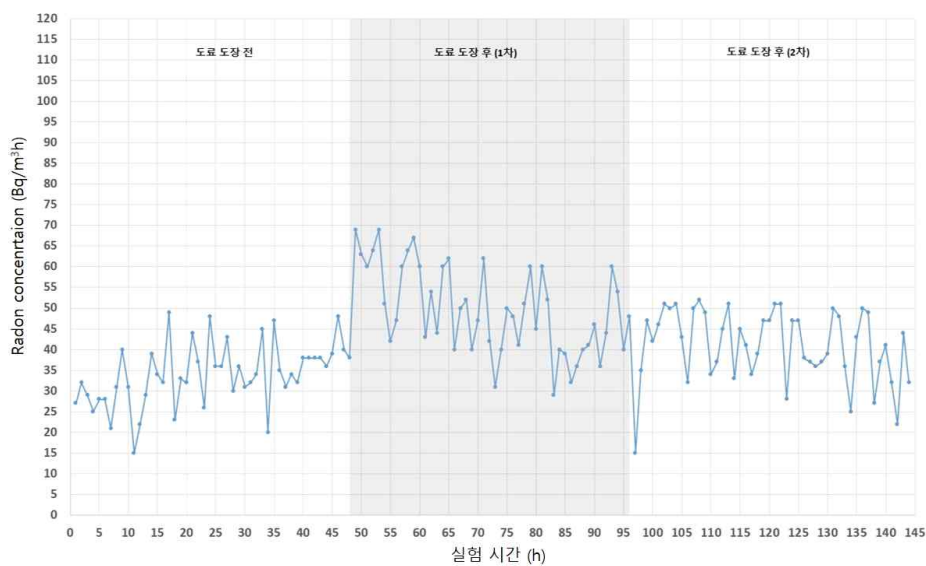
[그림 15]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 15)



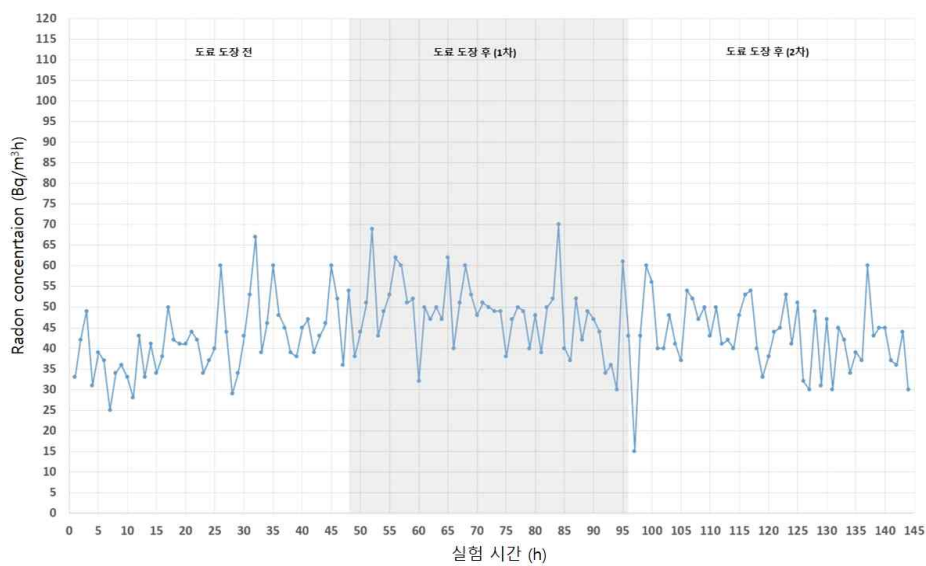
[그림 16]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 16)



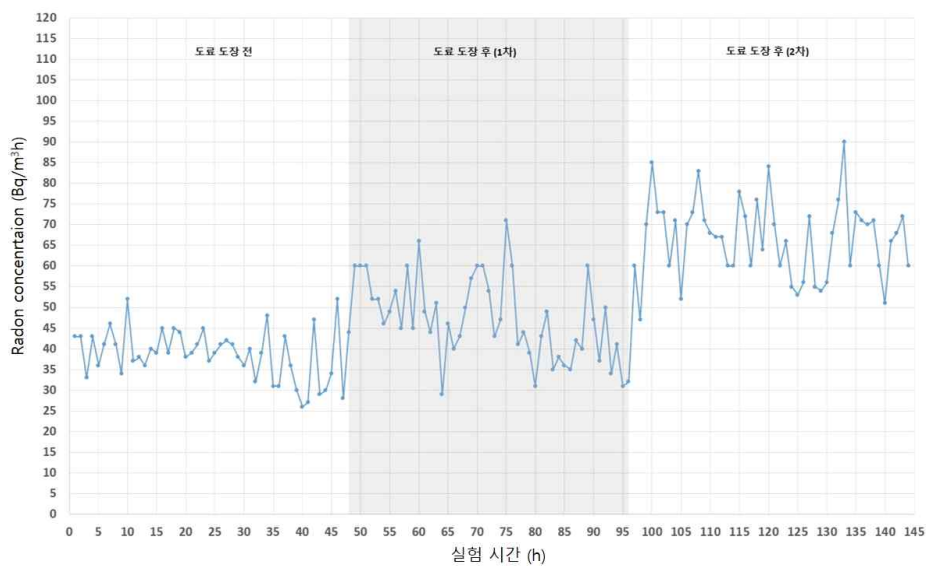
[그림 17]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 17)



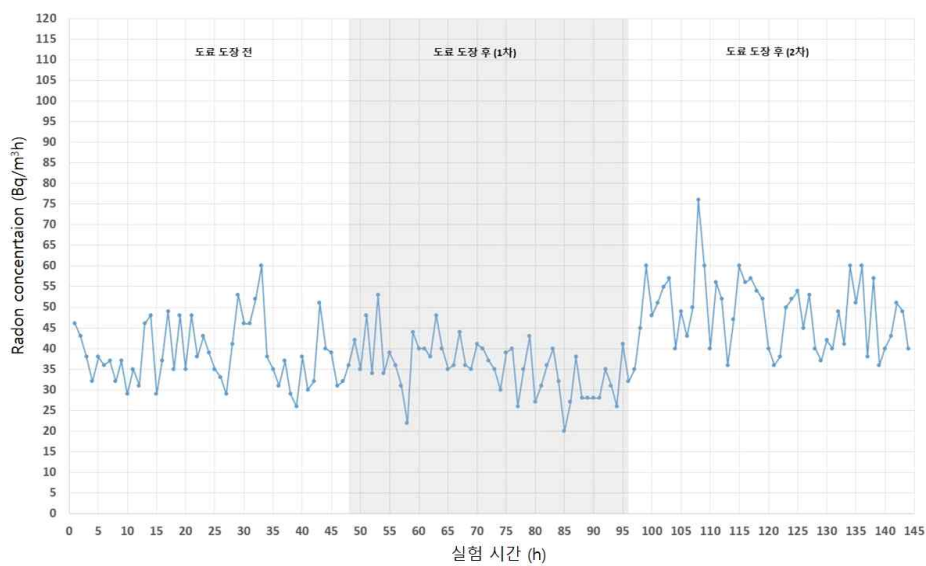
[그림 18]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 18)



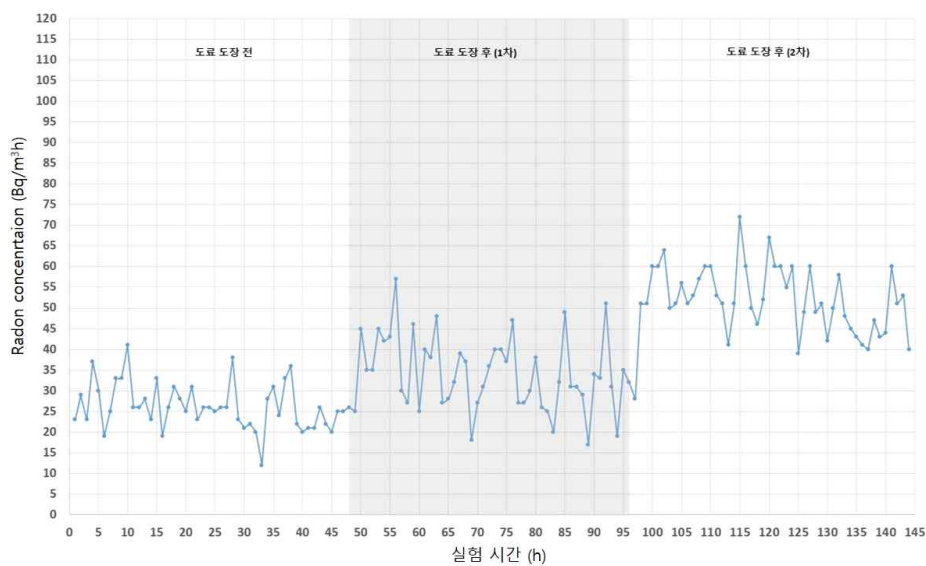
[그림 19]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 19)



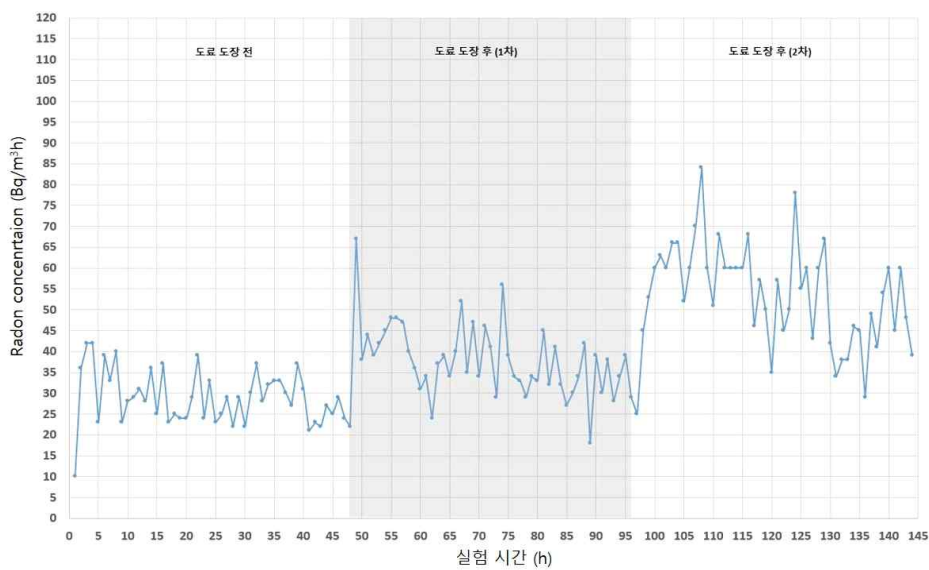
[그림 20]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 20)



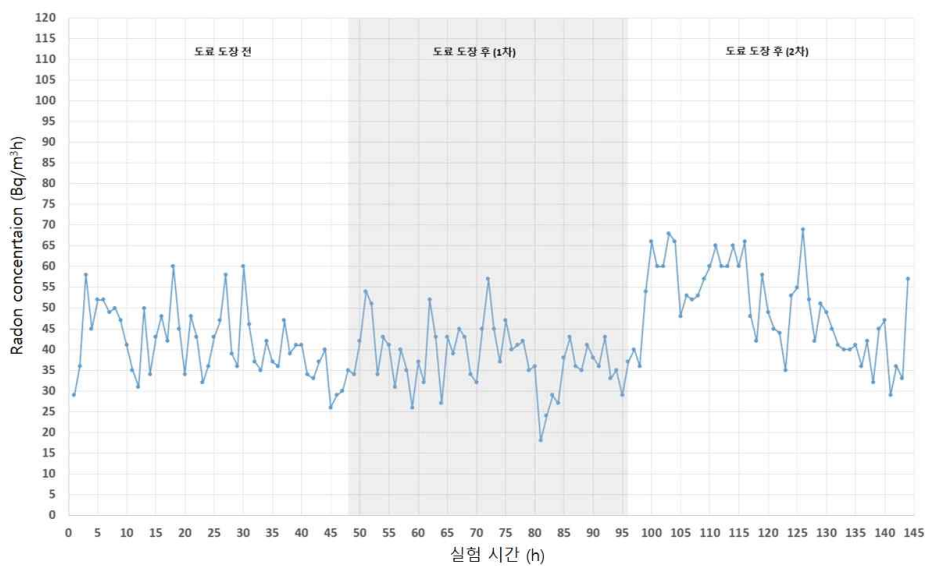
[그림 21]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 21)



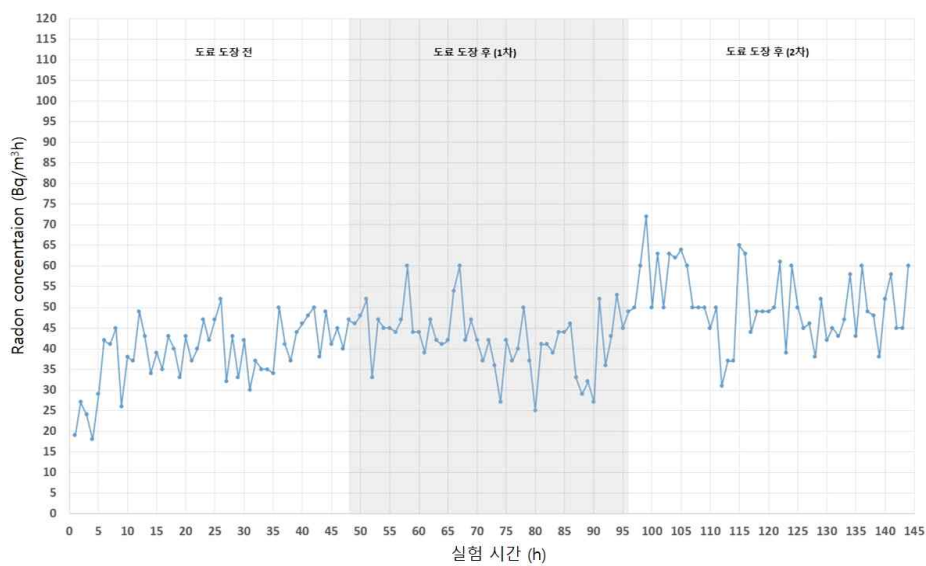
[그림 22]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 22)



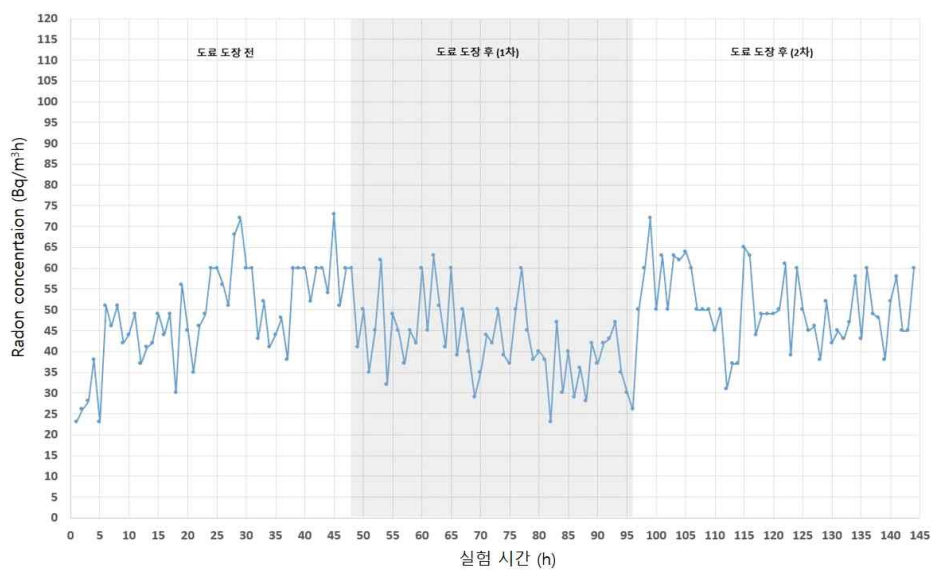
[그림 23]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 23)



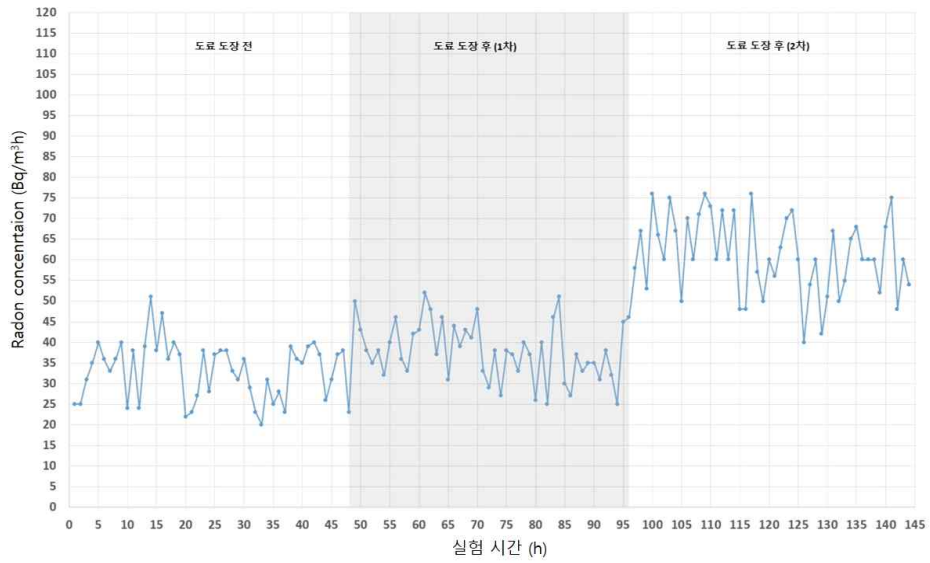
[그림 24]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 24)



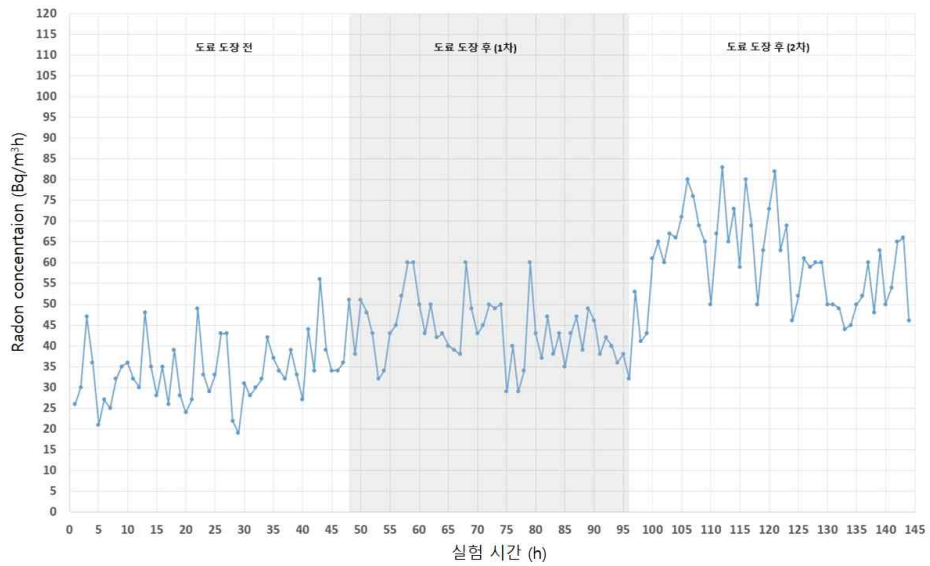
[그림 25]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 25)



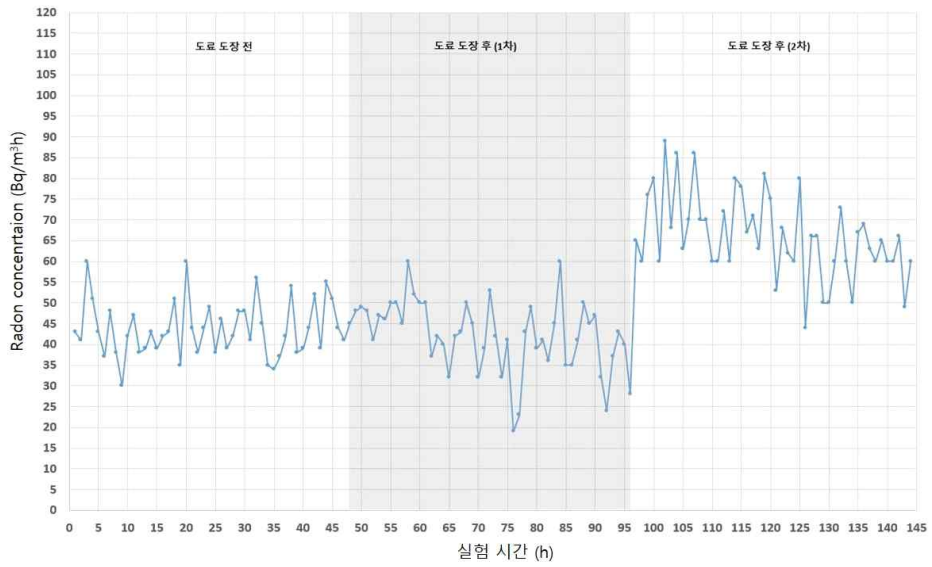
[그림 26]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 26)



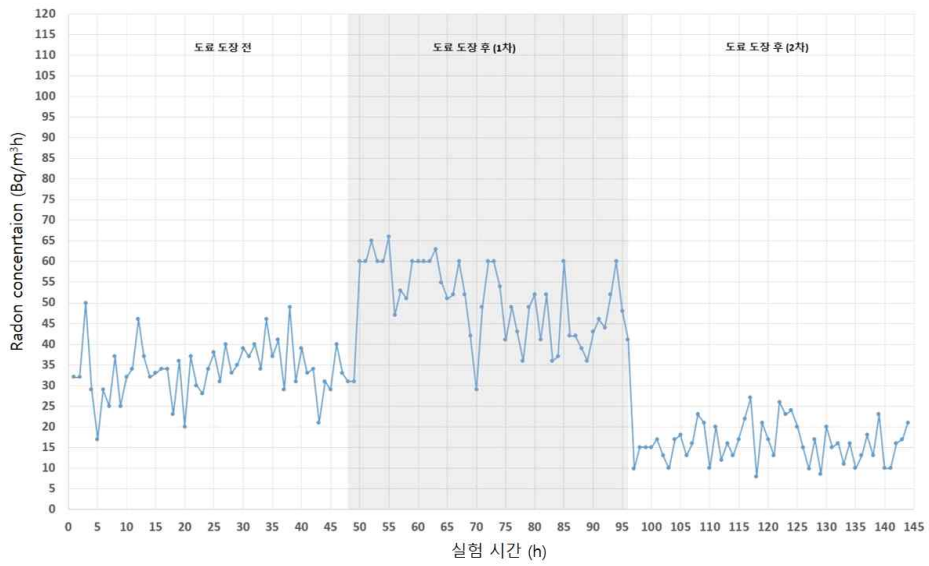
[그림 27]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 27)



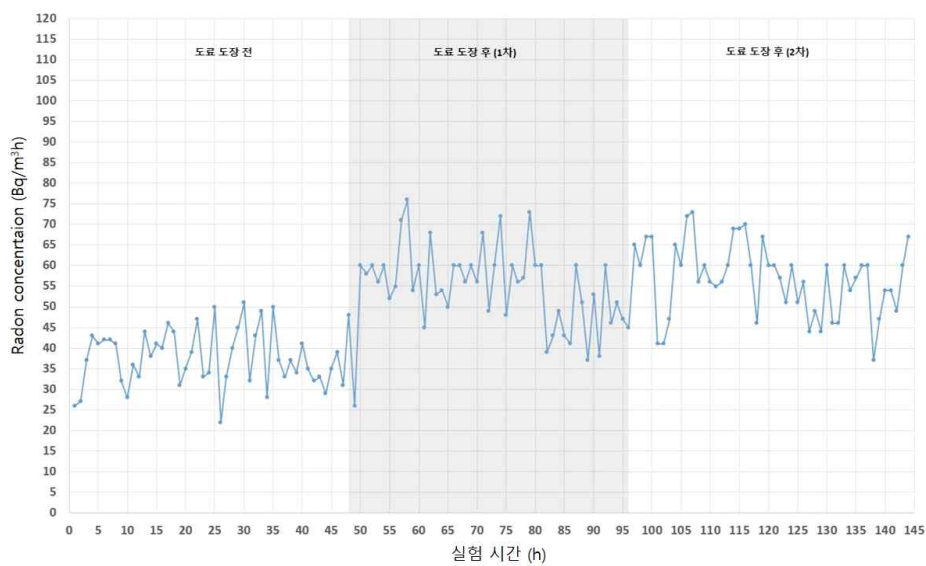
[그림 28]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 28)



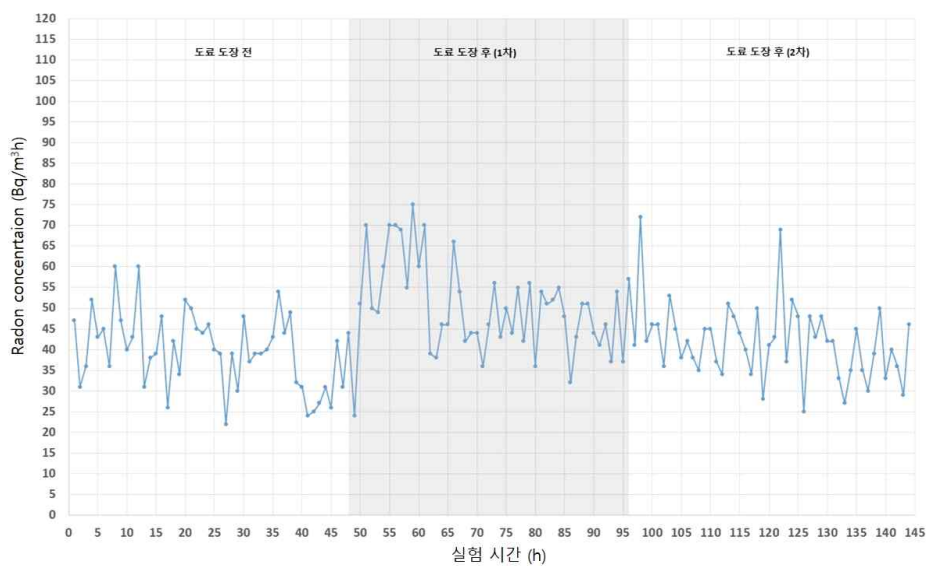
[그림 29]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 29)



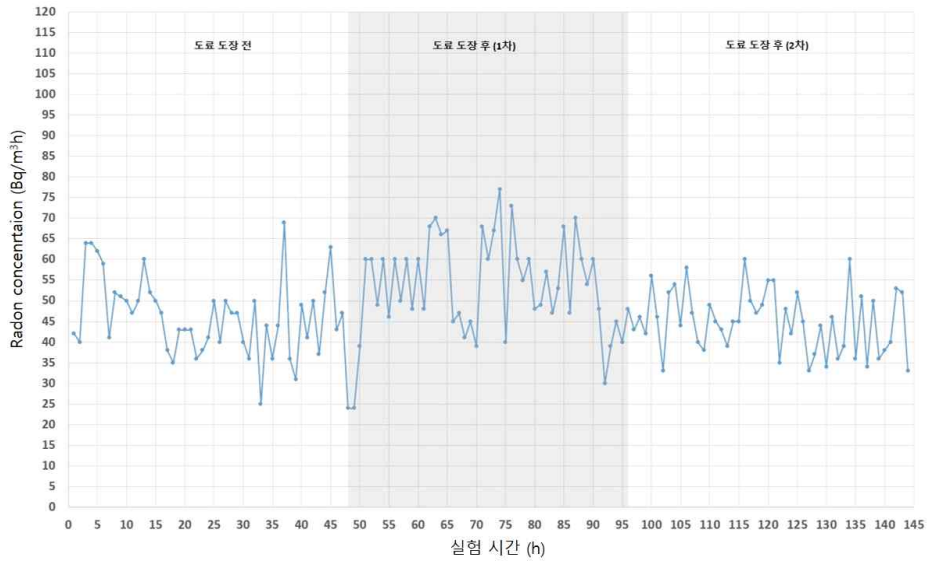
[그림 30]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 30)



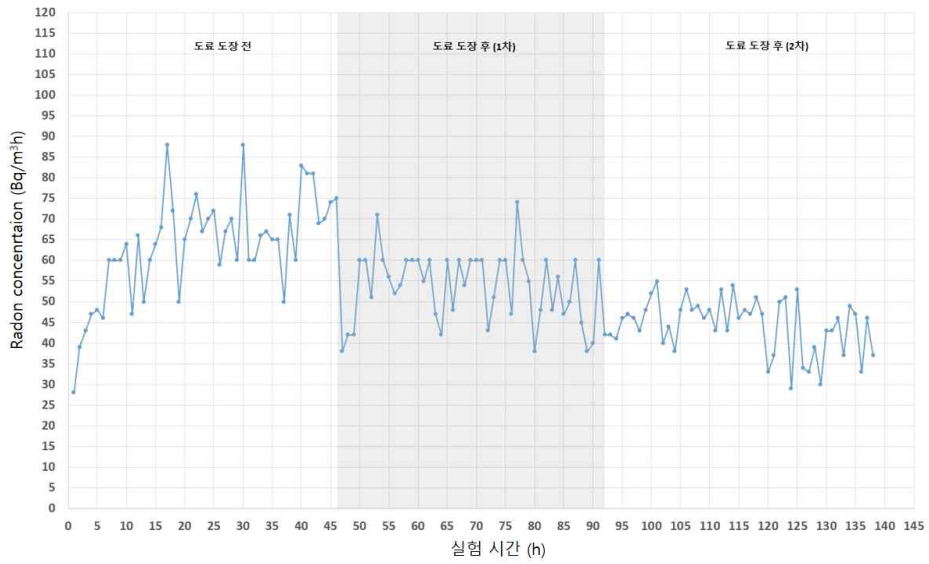
[그림 31] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 31)



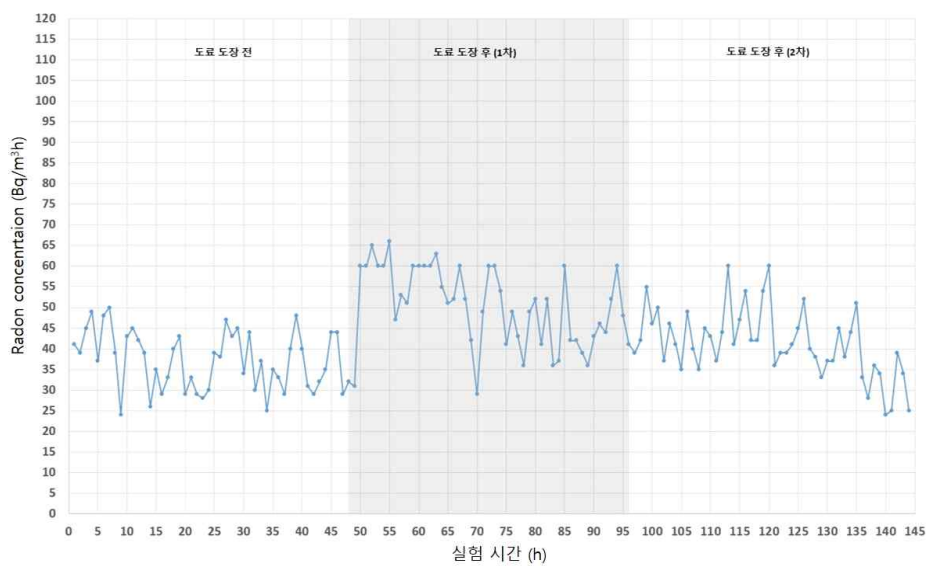
[그림 32] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 32)



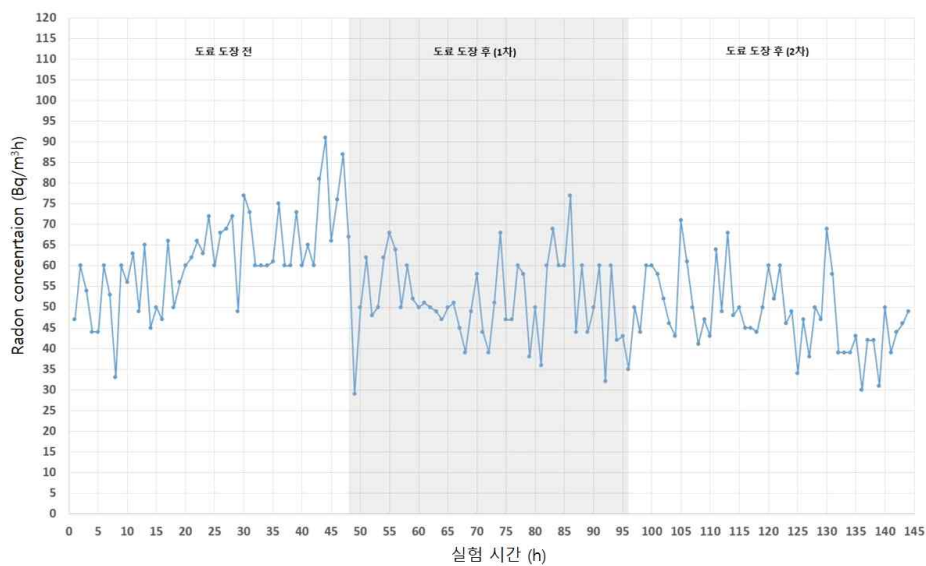
[그림 33] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 33)



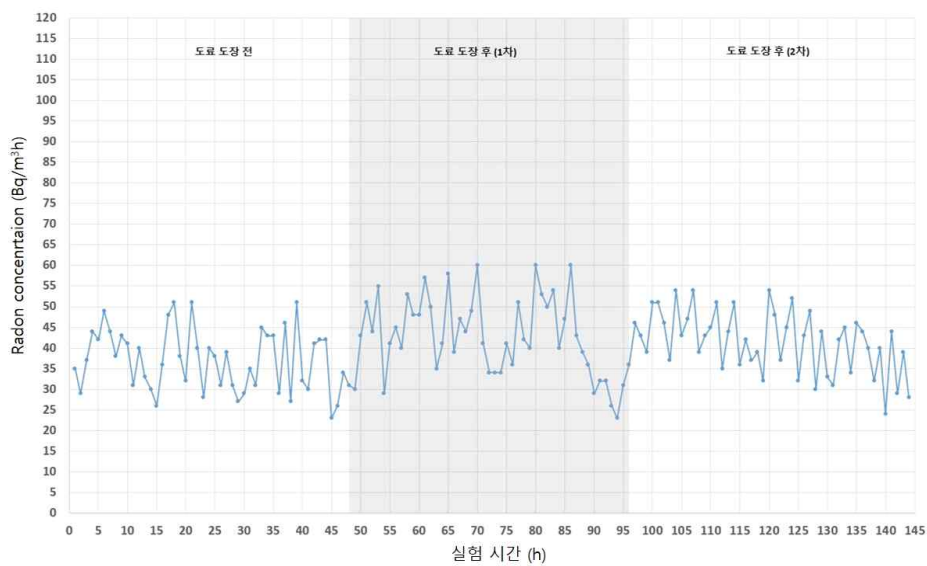
[그림 34] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 34)



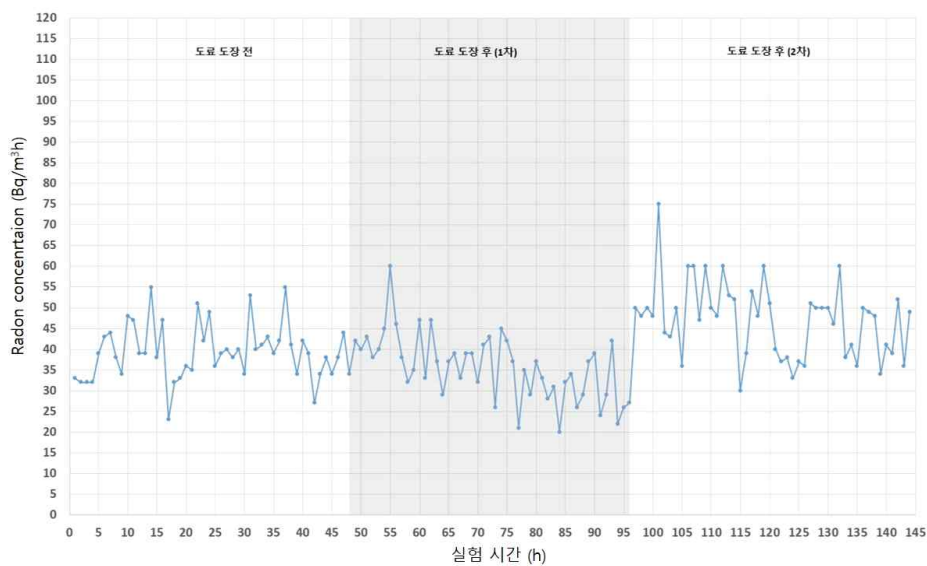
[그림 35] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 35)



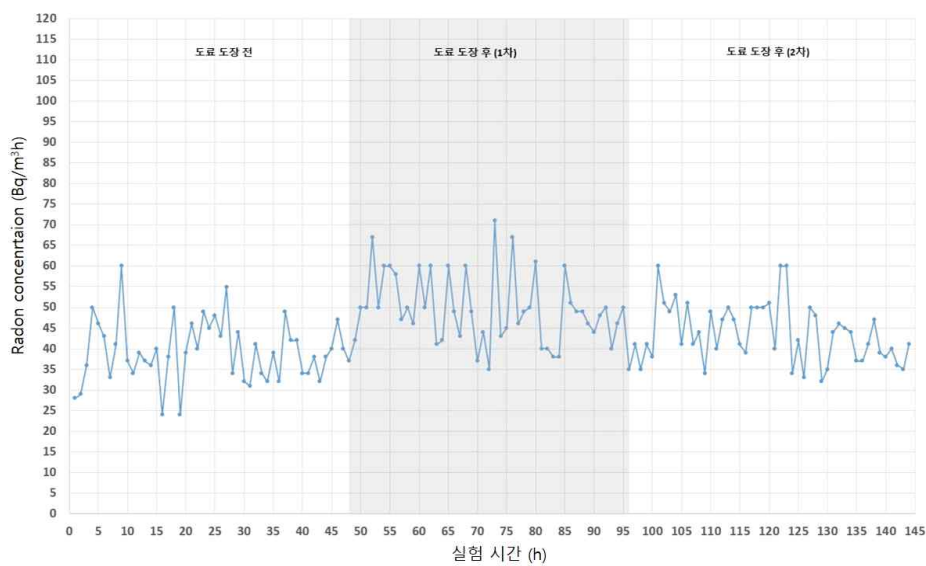
[그림 36] 시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 36)



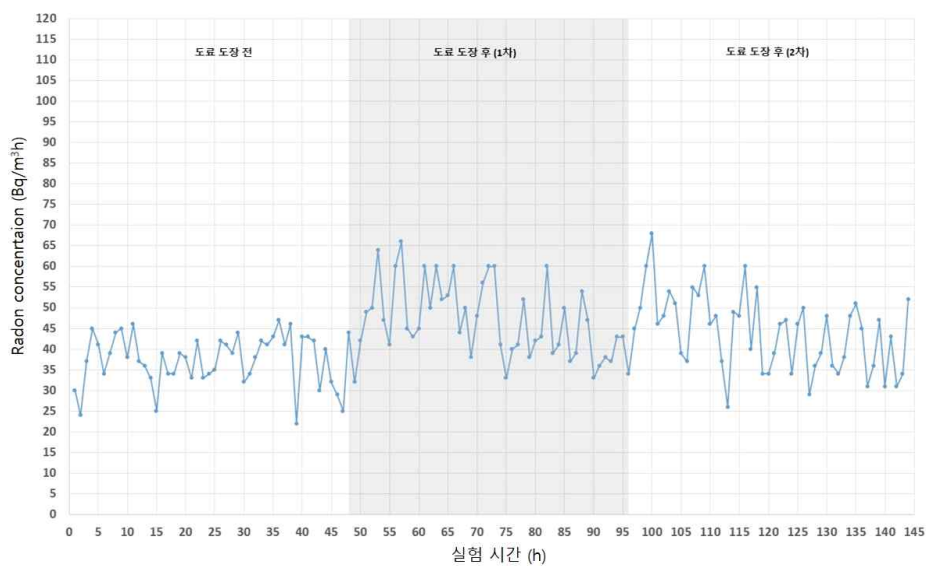
[그림 37]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 37)



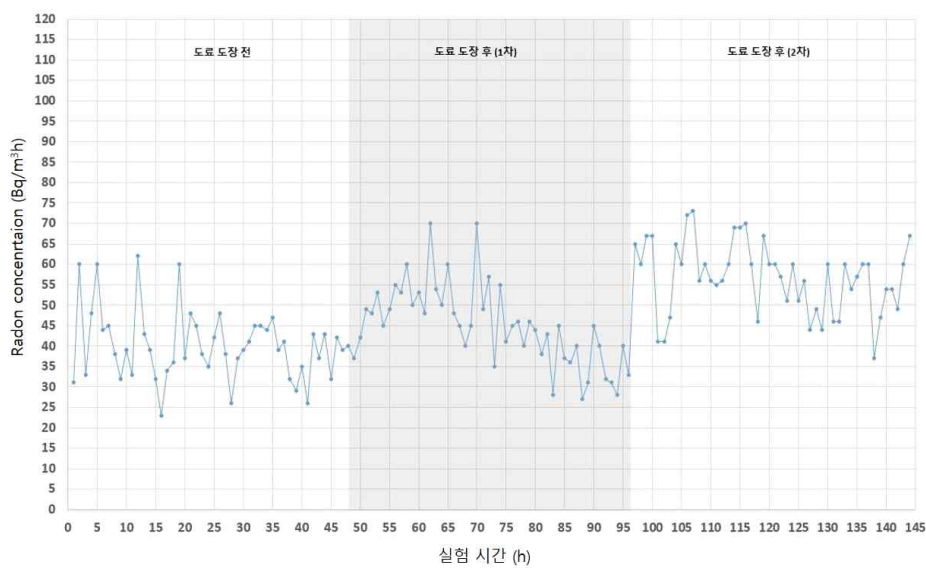
[그림 38]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 38)



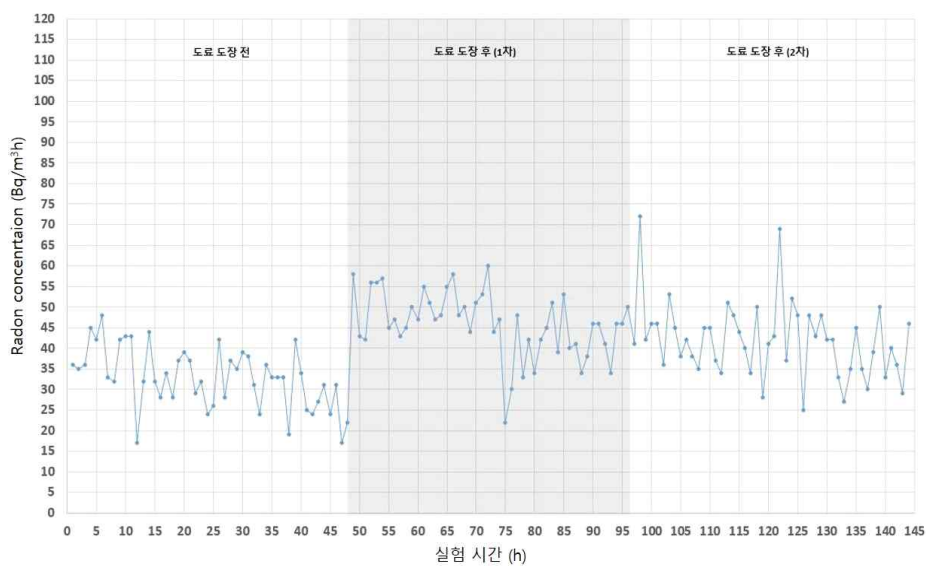
[그림 39]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 39)



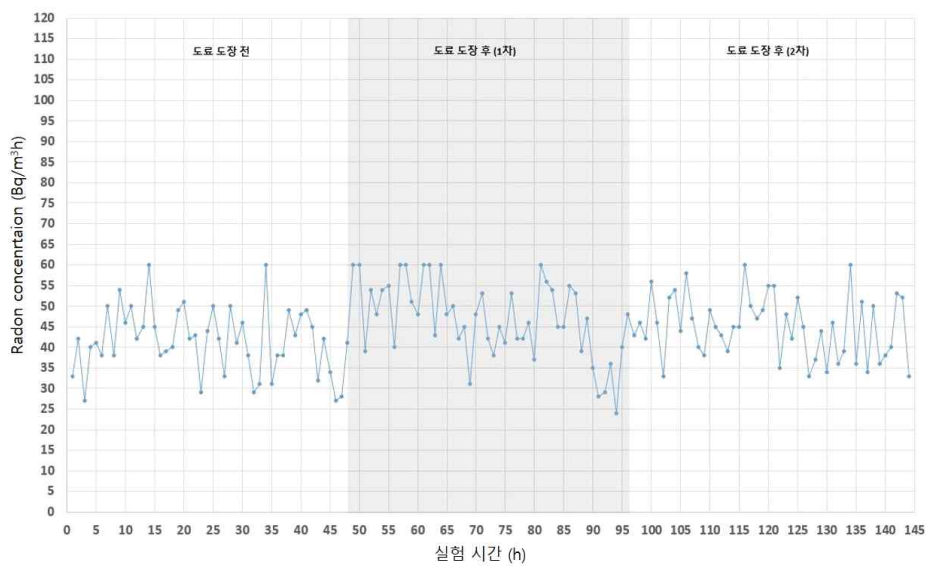
[그림 40]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 40)



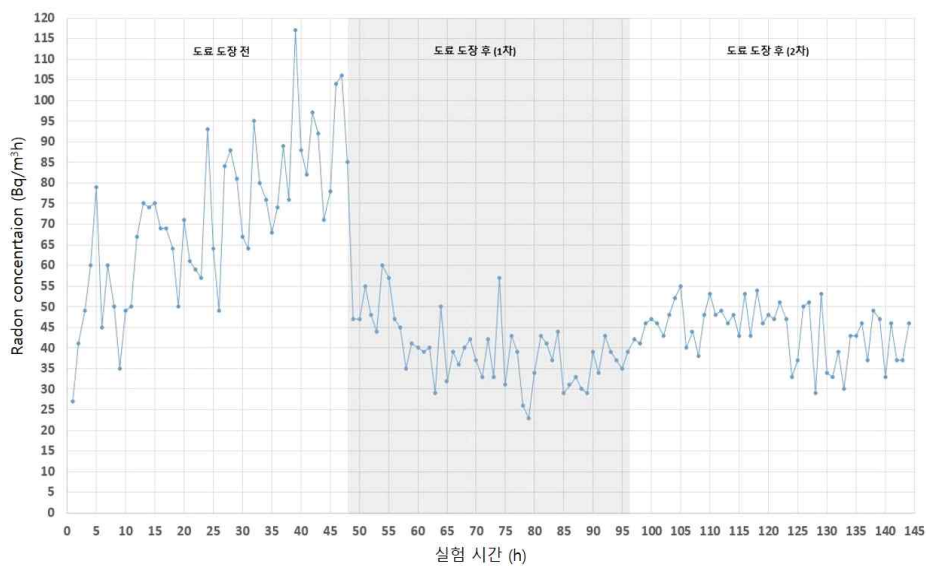
[그림 41]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 41)



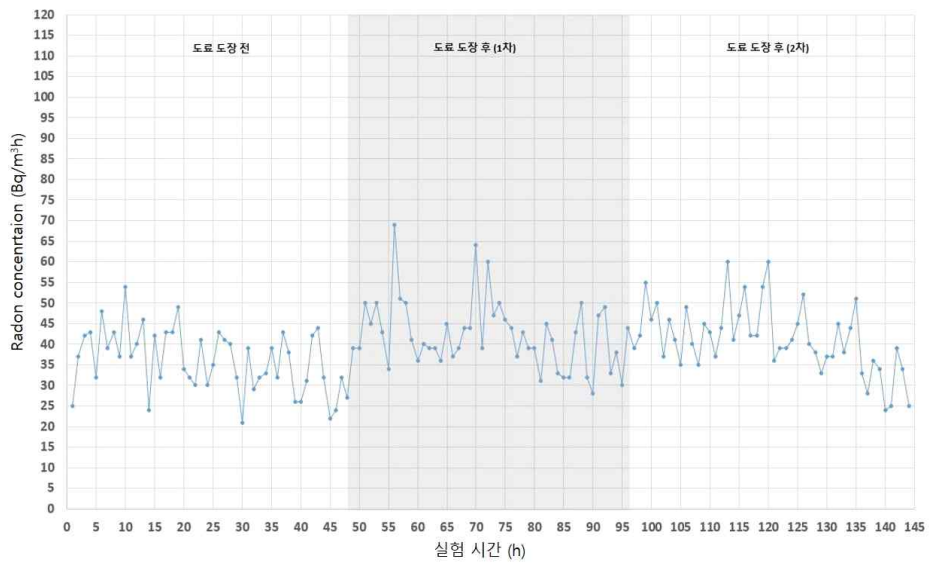
[그림 42]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 42)



[그림 43]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 43)



[그림 44]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 44)



[그림 45]시간경과에 따른 표면 라돈 방출량 변화 (Sample 45)