



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

밀폐챔버법을 이용한
라돈방출률 평가에 있어
기하구조 인자의 영향 분석

Effects of Geometric Factors
on Radon Exhalation Rates Evaluation
using Closed Chamber Method

2022년 08월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부 원자핵전공

강진구

밀폐챔버법을 이용한
라돈방출률 평가에 있어
기하구조 인자의 영향 분석

지도 교수 김 기 현

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2022년 08월

서울대학교 대학원
에너지시스템공학부 원자핵전공
강 진 구

강진구의 공학석사 학위논문을 인준함
2022년 08월

위 원 장 _____ 정 경 재 _____ (인)

부위원장 _____ 김 기 현 _____ (인)

위 원 _____ 장 미 _____ (인)

초 록

본 연구에서는 라돈방출률 측정의 반복성과 재현성을 확보한 상태에서, 동일한 시료에 대해 부피방출 방식과 표면방출 방식으로 각각 측정하여 도출한 라돈방출률이 서로 다른 값을 나타냄을 실험적으로 확인하고 원인을 규명하였다. 표면방출 측정을 통해 도출한 방출률은 측정을 수행하는 영역의 방출면적에 따라 각기 다른 결과값을 나타내며, 부피방출 측정을 통해 도출한 방출률보다 큰 값을 보임을 확인하였다. 하지만, 기존 라돈방출률 연구에서는 대부분 건축자재에 대해 두께 및 부피대비 표면적 등 기하인자를 고려하지 않았으며, 시료의 라돈 방출을 1차원으로 가정하여 확산 유효부피에 해당하는 기하인자를 고려하지 않았다. 본 연구에서 시료의 크기 대비 확산 유효부피가 클 경우, 시료의 크기가 충분히 큰 경우보다 라돈방출률은 작게 측정될 수 있음을 실험적으로 밝혔다. 또한, 방출면적이 작아질수록 방출면적 대비 확산 유효부피가 커져 표면방출률이 크게 평가되었다. 마지막으로, 후방확산의 영향으로 측정면 쪽의 라돈농도가 라돈방출률에 감소에 기여하듯이, 측정면 반대쪽의 라돈농도에 의해 라돈방출률이 크게 평가될 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

주요어 : 표면방출률

부피방출률

방출면적

밀폐챔버법

측정의 반복성과 재현성

확산 유효부피

학 번 : 2020-28890

목 차

제 1 장 서 론.....	1
제 1 절 연구의 배경.....	1
1. 라돈의 기원	1
2. 라돈의 특성	3
3. 라돈의 방출 메커니즘.....	4
4. 라돈의 유해성	6
5. 라돈에 의한 내부피폭과 선량평가.....	7
6. 실내 라돈농도	10
7. 라돈에 대한 방사선방호	11
8. 라돈방출률 측정방법.....	14
제 2 절 연구의 목적 및 필요성.....	16
제 2 장 연구내용 및 방법	18
제 1 절 실험재료 및 장비.....	19
1. 라돈측정챔버	19
2. RAD7 측정기	20
3. 라돈선원.....	21
4. 라돈측정기 교정용 챔버	22
5. 측정시료.....	22
제 2 절 라돈 mass transfer equation.....	23
제 3 절 라돈 확산방정식.....	26
1. 후방확산에 의한 자유방출률과 제한방출률의 관계	27
2. 라돈의 표면방출률과 부피방출률	31
제 4 절 실험절차	36
1. RAD7 교정.....	36
2. 측정값 보정을 위한 측정챔버 평가	39
3. 측정값의 재현성, 반복성 확인.....	42
4. 라돈 방출면적에 따른 라돈방출률 평가	43
제 3 장 결과 및 고찰.....	44
제 1 절 라돈 방출면적에 따른 라돈방출률 평가.....	44
제 2 절 확산 유효부피를 고려한 라돈방출률 차이.....	49
제 4 장 결론 및 제언.....	51
제 1 절 결론	51
제 2 절 제언.....	53
참고 문헌	54
Abstract.....	58

표 목차

표 1. 교정농도에 따라 측정농도 평균값과 측정시간, 측정값의 비 ...	38
표 2. 밀폐챔버의 누기율	41
표 3. 방출방식과 방출면적을 변화하였을 때, 챔버의 2층과 1층에서 라돈방출률과 가중평균된 라돈농도로부터 도출된 라돈방출률....	46
표 4. 표면 방출방식에서 방출률의 변화를 일으키는 원인과 영향....	48
표 5. 챔버의 2층을 질소퍼징 전후, 챔버 1층으로의 표면방출률 결과	50

그림 목차

그림 1. 우라늄 (^{238}U) 붕괴사슬	2
그림 2. 라돈의 발생원과 내부피폭 과정 도식화	2
그림 3. 라돈의 자손핵종 공기 중 거동 도식화	3
그림 4. 라돈방출의 과정 도식화	4
그림 5. 우리나라 국민의 2020년 기준 연간 평균 유효선량	7
그림 6. 라돈의 부피방출률(좌)과 표면방출률(우) 측정 모식도..	16
그림 7. 라돈방출률 측정을 위한 측정절차 순서도.....	18
그림 8. 챔버의 1층과 2층을 통해 각각 표면방출률과 부피방출률 측정이 가능한 라돈측정챔버 모식도.....	19
그림 9. 라돈 방출면적 조절(직경 65 mm, 45 mm, 25 mm)과 챔버 1, 2층 분리를 위해 제작된 아크릴판 모식도.....	20
그림 10. RAD7 전기적 집진방식 라돈 측정과정 도식화	21
그림 11. 반무한평면의 라돈시료로부터 라돈방출률과 평형상태의 라돈농도 도식화.....	27
그림 12. 밀폐챔버와 반무한평면의 라돈시료로부터 라돈방출률과 평형상태의 라돈농도 도식화	29
그림 13. 부피방출 방식으로 측정되는 라돈의 부피방출률 측정 모식도.....	31
그림 14. 표면방출 방식으로 측정되는 라돈의 표면방출률 측정 모식도.....	31
그림 15. 부피방출률 측정과 평형상태의 라돈농도 도식화.....	32
그림 16. 표면방출률 측정과 평형상태의 라돈농도 도식화.....	34
그림 17. 라돈선원과 교정용챔버를 이용한 RAD7 교정 모식도 ..	36
그림 18. 925 Bq/m^3 에서 RAD7 2대 상대교정 시 측정 농도 그래프	37
그림 19. $200, 550 \text{ Bq/m}^3$ 에서 RAD7 2대 상대교정 시 측정 농도 그래프	37
그림 20. 교정농도에 따라 RAD7 1번에 대한 2번의 측정된 평균라돈농도 비.....	38

그림 21. 챔버 전체 누기율 평가 실험의 시간에 따른 라돈농도 그래프	40
그림 22. 챔버 1,2층 누기율 평가 실험의 시간에 따른 라돈농도 그래프	41
그림 23. 방출면적과 방출방식 변화하였을 때, 시간에 따른 챔버의 1층과 2층에서 측정된 라돈농도 그래프	45
그림 24. 방출면적과 방출방식 변화하였을 때, 시간에 따른 챔버의 1층과 2층의 측정된 라돈농도를 부피에 대해 가중평균한 라돈농도 그래프	45
그림 25. 방출면적에 따라 시료내 확산 유효부피 모식도	47
그림 26. 챔버의 2층을 질소퍼징하고, 1층에서 방출면적이 직경 65 mm일 때 시간에 따른 라돈농도 그래프	49
그림 27. 챔버의 2층을 질소퍼징하고, 1층에서 방출면적이 직경 25 mm일 때 시간에 따른 라돈농도 그래프	49

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경

1. 라돈의 기원

지구의 탄생 이후로, 지구상에는 1억년 이상의 긴 반감기를 가져 현재까지 소멸되지 않고 존재하는 방사성핵종이 존재한다. 자연 중에 현재까지 존재하는 방사성물질을 천연방사성물질(NORM; naturally occurring radioactive material)이라고 부르며, ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K 이 대표적이다. 이들 중, ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th 는 각각 우라늄계열, 악티늄계열, 토륨계열의 방사성 붕괴사슬을 갖는다. 3개의 방사성 붕괴사슬은 모두 라돈($_{86}\text{Rn}$)을 포함하고, 자연상에서 라돈($_{86}\text{Rn}$)은 3가지 형태의 방사성동위원소로 각 붕괴사슬에 포함되고 방사성붕괴를 한다 — 라돈: ^{222}Rn ($T_{1/2} = 3.82$ d), 토론: ^{220}Rn ($T_{1/2} = 55.6$ s), 악티논: ^{219}Rn ($T_{1/2} = 3.96$ s). 이 중, ^{222}Rn 이 통상적으로 라돈이라 지칭되며, 비활성기체로 그림 1과 같이 우라늄사슬의 구성원 중 고체상태인 ^{226}Ra 의 알파붕괴로 주로 지각에서 형성된다. 라돈(^{222}Rn)이 방사성붕괴되기전에 지각에서 방출되면, 공기 중에 라돈은 존재한다. 악티늄 계열의 최초핵종인 ^{235}U 는 ^{238}U , ^{232}Th 에 비해 상대적으로 짧은 반감기를 가져, 악티늄 계열의 구성원인 악티논(^{219}Rn)은 자연상 존재비율이 작아 내부피폭에 거의 영향을 미치지 못한다. 토론(^{220}Rn)의 경우, 라돈에 비해 반감기가 짧아, 공기 중으로 방출되기전에 방사성붕괴를 할 확률이 높아 라돈이 방사선피폭의 주요관심대상이자 관리대상이다. 따라서, 본 연구는 라돈에 초점을 맞춘다.

라돈은 천연방사성물질이므로 그림 2와 같이 토양과 암석에 주로 존재하고 있다(LH, 2019). 지질의 특성으로 지각에 ^{238}U 은 서로 다른 농도로(ppm 수준) 존재하여, 라돈의 함량이 다르다(ICRP, 2014). ^{238}U 이 많을수록 라돈의 모핵종인 ^{226}Ra 이 많아 생성되는 라돈의 양이 많기 때문이다. 일반적으로 화강암은 높은 ^{226}Ra 함량을 갖고, 퇴적암과 변성암은 중간정도, 현무암과 석회암은 낮은 라돈함량을 갖는 것으로 알려져 있다(UNSCEAR, 2000). ^{238}U 함량이 낮지만 ^{236}Ra 의 함량이 많은 건축자재가

존재하며, 백반혈암 콘크리트와 인산석고 부산물, 응회암으로 만들어진 건축자재가 예시에 해당한다(G Keller, 2001, WHO, 2010).

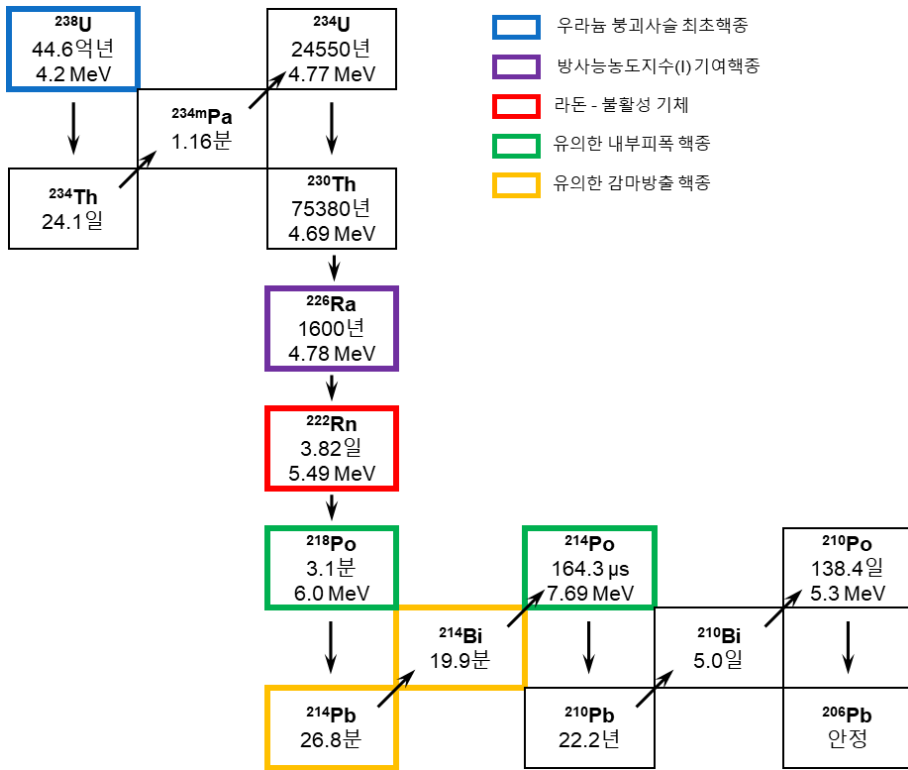


그림 1. 우라늄 (^{238}U) 붕괴사슬

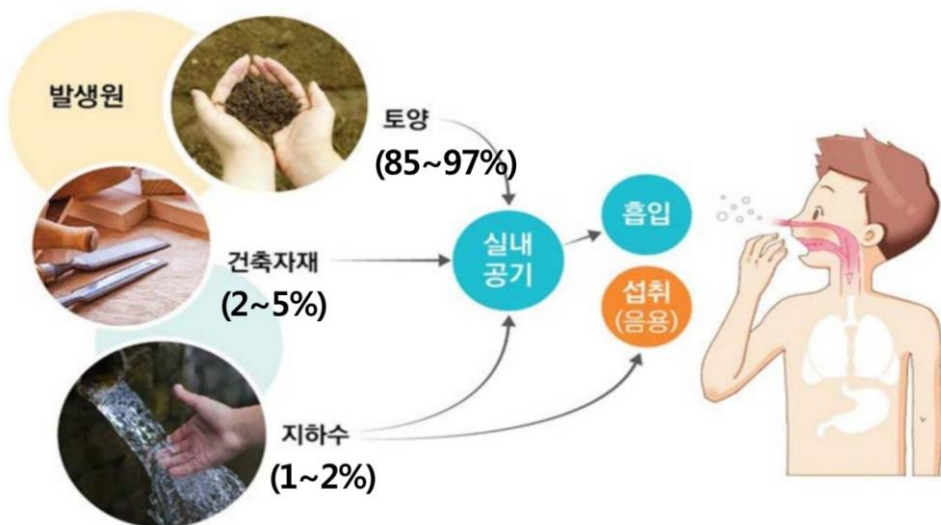


그림 2. 라돈의 발생원과 내부피폭 과정 도식화

2. 라돈의 특성

라돈은 가장 무거운 비활성기체로 화학적으로 매우 안정하지만, 방사성동위원소로 물리적으로 불안정하여 그림 1과 같이 알파붕괴를 하여 고체상태의 ^{218}Po 으로 변환된다. 우라늄 붕괴사슬을 따라 ^{218}Po 도 알파붕괴를 하여 ^{214}Pb 으로 변환되고, ^{214}Pb 과 ^{214}Bi 는 각각 베타붕괴를 하며, 최종적으로 안정한원소인 ^{206}Pb 이 될 때까지 붕괴한다. ^{222}Rn 으로부터 붕괴한 ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po , ^{210}Pb , ^{210}Bi , ^{210}Po , ^{206}Pb 은 라돈의 자손핵종(radon progeny), 라돈붕괴생성물(radon decay products)이라 불린다.

라돈은 알파붕괴시 5.59 MeV의 Q값을 갖고, 운동량 보존법칙에 따라 딸핵종인 ^{218}Po 과 알파입자는 각각 약 0.1 MeV, 5.49 MeV의 에너지를 나눠 갖는다. ^{218}Po 은 약 0.1 MeV의 에너지를 갖고 되튐(recoil)되며, 중성 또는 양전하가 된다(*J Porstendorfer, 1979*). 기체상태의 라돈으로부터 생성된 라돈의 자손핵종은 고체상태로 그림 3과 같이 양이온이나 중성원자를 형성하며 약 0.5 nm의 직경을 갖는다. 공기 중의 다른 분자나 수분에 클러스터링(clustering)하여 매우 빠르게(<1 s) 직경이 0.5–5 nm로 증가하고, unattached fraction로 일컬어진다. 이후, 에어로졸에 부착되면서 약 20–500 nm의 직경을 갖고 attached fraction이라 일컬어진다(*J Porstendorfer, 1994; UNSCEAR, 2000*).

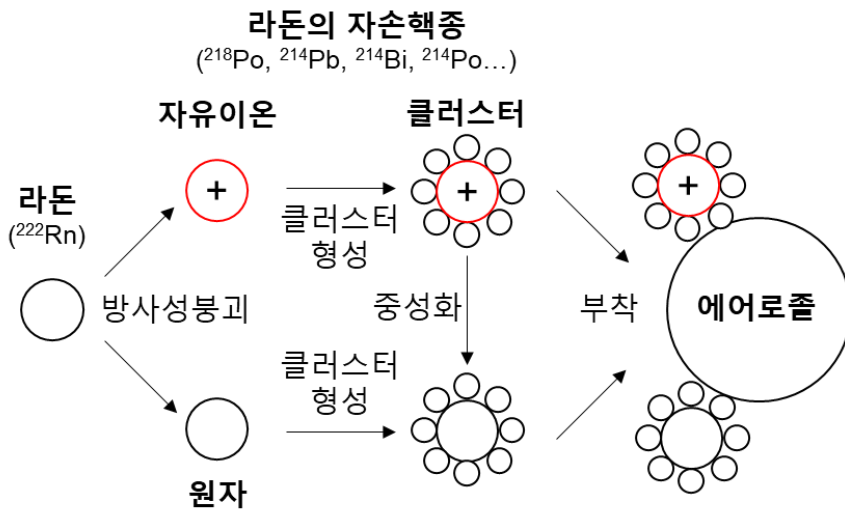


그림 3. 라돈의 자손핵종 공기 중 거동 도식화

3. 라돈의 방출 메커니즘

라돈이 암석과 토양내에서 생성되어 공기중으로 방출되는 과정은 그림 4와 같이 방사(emanation), 수송(transport), 방출(exhalation)을 따른다. 토양과 암석 중 공극은 주로 ^{226}Ra 으로부터 방사되어 생성된 라돈으로 채워져 있고, 수송을 통해 방출 시 라돈은 실외 공기중 존재한다(ICRP, 2014). 라돈의 방사는 고체상태인 ^{226}Ra 의 알파붕괴와 라돈원자의 되튐(recoil)으로 발생한다. ^{226}Ra 은 알파붕괴시 4.87 MeV의 Q값을 갖는다. 운동량보존법칙에 따라 알파선과 라돈은 에너지를 나눠 갖고, 알파선은 4.78 MeV의 에너지를 갖고, 라돈은 평균 되튐에너지로 86 keV를 갖는다(IAEA 2013). 기체상태인 라돈원자의 되튐거리가 시료의 격자 표면거리와 상응하면, 라돈이 격자에서 공극으로 방사된다. 공극으로 방사된 라돈은 확산(diffusion)과 이류(advection)에 의해 암석의 공극을 따라 수송된다. 시료의 표면으로 이동한 라돈은 최종적으로 공기중으로 방출된다.

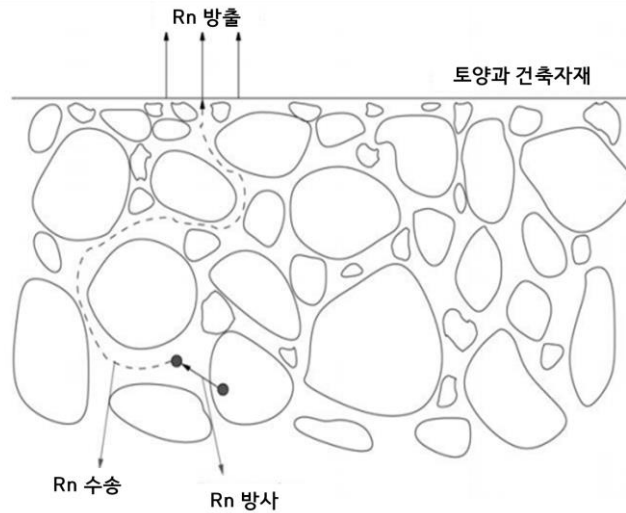


그림 4. 라돈방출의 과정 도식화

라돈이 시료의 격자에서 공극으로 방출되는 비율은 방사계수(emanation coefficient), emanation factor, emanation power, emanation fraction으로 불린다. 암석과 토양의 일반적인 방사계수는 0.05~0.7로 알려져 있다(WW Nazaroff, 1992). 격자(grain)의 모양과 크기, 수분함량은 라돈방사에 영향을 미치는 3가지 중요한 요인으로, 일반적으로 격자 크기가 커지면 라돈방사계수는 작아진다. 또한, ^{226}Ra 이 격자의 표면에 많이 분포할수록 라돈방사계수는 커진다. 미시적 균열 같은 나노공극도 라돈방사계수의 증가요인으로 작용한다. 시료내의 수분은 격자를 둘러싸는

얇은 수분필름의 형성을 이끈다. 이로 인해 라돈이 되됨에 의해 공극을 건너서 다른 인접한 격자에 박히는 대신에 공극으로 붙잡힐 가능성을 증가시킨다(UNSCLEAR, 2000). 또한, 수분함량이 증가함에 따라 공극으로 방출된 라돈이 고체상의 격자에 흡착(adsorption)될 확률은 감소한다(VC Rogers, 1991).

공극으로 방출된 라돈의 수송은 주로 확산과 이류에 의해 이루어진다. 확산은 공극내 포함된 라돈핵종 농도의 기울기(gradient)로 발생하고, 이류는 압력차이에 의해 발생한다. 공극확산계수 D_e 는 interstitial 또는 유효(effective) 확산계수라 일컬어진다. D_e 는 $\frac{D}{\epsilon}$ 와 같고, 여기서, D 는 부피(bulk) 확산계수, ϵ 은 공극률을 의미한다. 라돈에 관한 연구에서는 격자내 라돈의 확산거리에 관련이 있는 유효확산계수가 주로 사용되고 흔히 확산계수라 일컬어진다(IAEA, 2013). 라돈의 확산계수는 시료의 종류에 따라 영향을 받으며, 공극의 크기 분포, 수분함량, 시료의 압축정도에 영향을 받는다. 공극이 많을수록, 시료의 압축정도가 적을수록 유효확산계수는 커진다. 또한, 공극률 ϵ 은 공기로 채워진 부분 ϵ_a 과 수분이 채워진 부분 ϵ_w 으로 구분계수 K_T 에 의해 $\epsilon_a + K_T\epsilon_w$ 로 표현된다(WW Nazaroff, 1988; UNSCEAR, 2000). 수분함량이 적을 때, 유효확산계수는 거의 영향을 받지 못하지만, 수분함량이 높은 상황에서 공극이 물에 막혀 확산은 감소하기 때문에 확산계수는 작아진다(IAEA 2013). 비록 확산이 공기 중으로 방출되는 라돈의 수송을 지배하지만, 바람과 기온차로 발생한 기압차는 라돈의 이류 효과도 발생시킨다.

어떤 시료 내의 라돈은 방사와 수송에 의해 최종적으로 공기중으로 방출된다. 여러가지 변인들은 라돈 방사와 수송 각각에 영향을 미치고, 시료 내의 수분함량과 공극률, 온도 등이 변인들에 해당한다. 수분함량의 경우, 앞서 언급한 바와 같이, 방사계수와 확산계수에 모두 영향을 줘, 콘크리트의 경우 시료의 수분함량이 높아짐에 따라 50-60%까지 선형적으로 증가하며, 약 70-80%에서 최대값을 가지고, 급격하게 감소한다(I Cozmuta, 2003). 상대습도는 시료의 수분함량에 영향을 미치고 확산에 주로 영향을 미쳐, 일반적으로 상대습도가 증가함에 따라 라돈방출률은 감소한다. 또한, 온도가 증가함에 따라, 라돈이 액체상에 흡착되는 양이 감소하여 라돈방출률은 증가한다(WW Nazaroff, 1988).

4. 라돈의 유해성

라돈의 유해성에 대한 역사는 광부들의 높은 사망률로부터 시작되었다(*ICRP, 2014*). 17세기 전에 광부들 사이에서 높은 사망률의 존재가 인지되었고, 19세기 말에 죽음의 주요원인으로 폐암이 확인되었다(*Haerting and Hesse, 1879*). 이후, 1924년에 폐암이 라돈에 의한 피폭으로부터 기인하였다고 제안되었다(*Ludewig and Lroenzer, 1924*). 반면에, 실내 라돈에 의한 피폭이 꽤 높다고 인식하기 전인 1970년대까지 환경상의 라돈에 의한 피폭은 거의 주목받지 못하였다.

1986년 세계보건기구(WHO)에 의해 라돈은 공식적으로 폐암 원인으로 인식되었다(*WHO, 1986*). WHO의 산하기관인 국제암연구소(IARC)는 라돈을 발암물질 1군으로 지정하였다(*IARC, 1988*). 지역별 평균라돈농도에 따라 폐암 발생 비율의 3-14%는 라돈으로 알려져 있으며, 라돈을 흡연 다음으로 폐암의 주요원인물질로 분류하고 있다(*WHO, 2009*). 또한, 흡연자가 라돈에 노출되었을 경우, 비흡연자에 비해 폐암발생확률은 약 25배 높다고 알려져 있으며(*WHO, 2010*), 2019년에 세계적으로 라돈에 의한 피폭으로 인한 폐암 사망자는 84,000명인 것으로 나타난다(*WHO, 2022*).

5. 라돈에 의한 내부피폭과 선량 평가

① 라돈에 의한 내부피폭과 원인

우리나라 국민 일인당 평균 방사선 피폭선량은 2020년 기준 연간 약 7.31 mSv이다(KINS, 2020). ^{86}Rn 은 그림 5와 같이 자연방사선 피폭량 중 약 56%를 차지하며, 대부분은 ^{222}Rn 에 의한 내부피폭이다. 우리나라 국민 평균 방사선 피폭선량은 2009년 기준 3.82 mSv보다 3.49 mSv 증가하였고, 주요원인은 의료행위의 증가와 라돈 및 토론의 선량환산계수의 증가이다. 이로 인해 의료피폭은 2009년 보다 1.31 mSv 증가하였으며, 자연방사선원 중 라돈 및 토론의 선량환산계수의 증가로 인해 ^{86}Rn 에 의한 내부피폭은 2009년(1.40 mSv)보다 2.22 mSv 증가하였다. 비교적 낮은 준위 피폭에서 라돈에 의한 피폭과 폐암치사 사이에 유의한 상관성은 라돈 및 토론의 선량환산계수의 증가를 이끌어, 국내에서 평가된 라돈에 의한 피폭선량을 약 2배로 증가시켰다(ICRP, 2010).

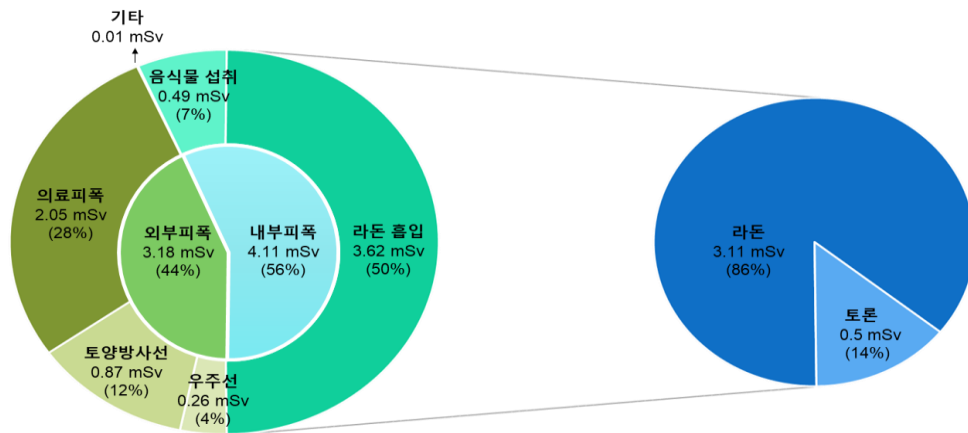


그림 5. 우리나라 국민의 2020년 기준 연간 평균 유효선량

라돈에 의한 내부피폭의 원인은 라돈기체에 의한 직접적인 피폭이 아닌 라돈의 자손핵종에 의한 내부피폭이다. 비활성기체인 라돈은 화학적으로 안정하여 흡입한 양 거의 전부가 날숨으로 방출된다. 실제로, 라돈의 자손핵종으로 인한 폐 피폭선량은 라돈에 비해 100배 이상 높으며, 피폭선량의 약 99%는 라돈이 아닌 라돈의 자손핵종으로부터 발생한다(UNSCEAR, 2019; JW Marsh, 2008). 라돈의 자손핵종을

흡입하면 기관지의 표면에 침적(deposition)되고, 단반감기 라돈의 자손핵종은 주로 폐에서 제거되기 전에 붕괴한다. 단반감기 라돈의 자손핵종으로 ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po 이 해당하며, ^{218}Po 과 ^{214}Po 는 알파붕괴핵종으로 폐암위험을 지배한다(UNSCEAR, 2000; ICRP, 2010).

② 라돈에 의한 내부피폭 선량 평가

비록 라돈이 아닌 라돈의 자손핵종이 폐암에 기여하지만, 라돈의 자손핵종 대신에 라돈을 측정한다. 왜냐하면, 라돈농도의 측정이 상대적으로 저렴한 장비를 요구하고, 특히 장기적인 측정에 적합하기 때문이다(ICRU, 2012). 따라서, 라돈의 농도를 측정하여 라돈의 자손핵종으로부터 발생하는 피폭선량을 추정하기 위해 평형인자 F (equilibrium factor)가 도입되었다(UNSCEAR, 1982). 평형인자 F 는 측정된 실제 잠재알파에너지농도 $PAEC$ (Potential Alpha Energy Concentration)와 평형상태에서 라돈 자손핵종의 $PAEC$ 의 비로 정의된다. 즉, 측정된 라돈에 의한 $PAEC$ 와 평형상태의 $PAEC$ 로 결정된다. 하지만, 더 간단하게 평형상태의 라돈과 라돈 자손핵종의 농도인 평형등가농도 EEC (Equilibrium Equivalent Concentration)와 측정된 라돈의 농도 C_{Rn} 로부터 평형인자 F 는 식 (1-1)과 같이 표현된다. 평형농가농도 ECC 는 식 (1-2)와 같이 내부피폭을 일으키는 라돈 자손핵종의 농도로 결정되며, 상수는 라돈 자손핵종의 잠재알파에너지 비율로 결정된다. 평형인자는 라돈 자손핵종의 붕괴상수, 에어로졸 크기의 분포, 환기율 등에 영향을 받으며 실험적으로 결정된다. 평형인자 F 는 실내와 실외에서 보통 각각 0.4, 0.6으로 사용된다 (UNSCEAR, 2000).

$F = \frac{ECC}{C_{Rn}}$	(1-1)
$ECC = 0.105C_1 + 0.515C_2 + 0.380C_3$	(1-2)
<p>여기서, $C_1 = ^{218}\text{Po}$의 방사능농도 [Bq/m^3] $C_2 = ^{214}\text{Pb}$의 방사능농도 [Bq/m^3] $C_3 = ^{214}\text{Bi}$의 방사능농도 [Bq/m^3]</p>	

1986년 라돈에 의한 광부 대상 폐암에 대한 역학조사연구로부터 시작된 라돈의 자손핵종 피폭의 전통적 단위는 워킹레벨 WLM(Working Level

Month)이다(*ICRP, 1993*). 1 워킹레벨 WL(Working Level)은 공기 1L 중 1.3×10^5 MeV의 알파에너지를 낼 단반감기 라돈 자손핵종의 임의조합이다. 잠재알파에너지농도 PAEC와 평형등가농도 ECC의 관계는 식 (1-3)과 (1-4)와 같다.

$PAEC = 0.27 \times ECC \quad [mWL]$	(1-3)
$PAEC = 5.56 \times 10^{-6} \times ECC \quad [mJ m^{-3}]$	(1-4)

에어로졸 크기분포, unattached fraction, 호흡률 등이 사용된 물리적 선량평가(physical dosimetry)와 역학조사연구(epidemiological study)로부터 유도된 일반인 대상 ECC당 유효선량은 보통 $9 \text{ nSv}/(\text{Bq h m}^{-3})$ 로 사용된다(*UNSCEAR, 1993*). 따라서, 측정된 라돈농도와 측정조건에서 평형인자, 점유도를 바탕으로 유효선량의 추정이 가능하며, 식 (1-5)와 같다.

$\text{유효선량} = 9 \times C_{Rn} \times F \times \text{Occupancy} \quad [mSv]$	(1-5)
<p>여기서, C_{Rn} = 라돈농도 [Bq m^{-3}] F = 평형인자 [] Occupancy = 점유도 [h]</p>	

6. 실내 라돈농도

앞서 살펴본 바와 같이 라돈의 원천은 토양과 건축자재로 라돈방출률은 시료의 수분함량, 공극률 등 방사와 확산에 기여하는 여러가지 요인들에 결정된다. 또한, 건물내의 라돈농도는 환기율, 실내외 온도차이, 압력차이에 따라 영향을 받으며, 한 공간의 크기 같은 실내공간의 특성과 창문을 열어두는 것과 같은 거주특성에도 영향을 받는다(*ICRP, 2014*). 건물내 라돈농도에 기여하는 중요한 요인 중 하나는 라돈의 토양으로부터 건물내부로의 이류이다(*UNSCEAR, 2000*). 이류는 압력차에 의해 발생하고, 압력차는 온도차이, 기계적 환기, 자연 환기에 의해 발생한다(*AJ Gadgil, 1992*). 온도차이는 굴뚝효과(stack effect)로 설명되어지는데 건물 내부의 온도가 높으면 공기의 밀도가 낮아져 압력이 외부보다 상대적으로 낮아져, 건축물의 바닥과 건물 아래 토양사이의 틈에 라돈이 내부로 유입되는 효과에 기여한다. 일반적인 단층건물에서는 라돈의 유입은 대부분 토양으로부터 이류에 의해 발생한다고 알려져 있다(*WW Nazaroff, 1988*). 하지만, 아파트와 같은 고층건물에서는 라돈 선원의 원인으로 건축자재에 대한 영향이 더욱 중요시되며, 상대적으로 많은 연구가 진행되지 않았다. 최근 건설되는 건축물의 경우, 과거보다 에너지 효율적인 고층 아파트의 건설이 증가하면서, 실내의 라돈농도 증가로 인한 방사선피폭의 잠재적인 증가를 초래하였다(*JV Yarmoshenko, 2020*).

7. 라돈에 대한 방사선방호

인류의 총 방사선피폭으로 볼 때, 라돈이 최대 피폭원으로 간주된다는 사실과 일반인에 대한 계획피폭으로 인한 법적 연간 선량한도가 1 mSv인 반면 라돈에 의한 일반인의 연간 내부피폭선량이 약 3.6 mSv임을 고려할 때, 방사선 방호의 관점에서 라돈은 보다 적극적인 대책을 강구해야 할 방호대상이다.

지역에 따라서 실외의 공기 중 라돈 농도는 높을 수 있지만, 일반적으로 라돈은 대기 중에 확산되면서 희석되므로, 대부분 지역에서 1-100 Bq m⁻³ 수준이고, 대부분의 경우 10 Bq m⁻³이다(UNSCEAR, 2000). 실외 라돈의 경우, 농도가 낮고 피폭경로를 제어하기 어렵기 때문에 인체에 대한 방사선 피폭 관점에서 관리 대상으로 포함하지 않는다(ICRP, 2014).

반면에, 실내 라돈 농도의 평균은 약 40 Bq m⁻³이고, 실내 공간마다 10-70000 Bq m⁻³의 큰 편차를 갖는다. 특히, ²³⁸U이 많은 지하광산, 화강암이 많은 지역에서 일반적으로 높은 라돈농도가 관찰된다. 비록 주거공간의 라돈이 대부분 토양으로부터 생성되지만, 건축자재로부터 라돈의 방출은 실내환경의 또 다른 잠재적인 라돈선원으로 알려져 있다(UNSCEAR, 2000). 또한, 국내의 건축물 특성상, 콘크리트를 사용한 고층 아파트가 상대적으로 많이 존재하여, 국내에서는 라돈선원으로 건축자재에 대한 관심이 집중되어 있다.

건축자재의 경우, 거주공간에 쓰이기 때문에 라돈의 장시간 노출을 야기한다. 보건학적으로 단기간에 고농도의 라돈에 노출되는 것보다 장기간에 걸쳐 저농도로 라돈에 노출되는 것이 위험도가 높다고 알려져 있다(EPA, 1999). 또한, 사람들은 대부분의 시간을 실내에서 보내므로, 라돈에 대한 인체 위험성은 실외보다 실내에서 장기간 노출로 인해 크다. 방사선방호 기본원칙에 따라 ICRP는 피폭 가능성, 피폭자 수, 개인 선량의 크기 등 경제사회적 인자를 고려하여 합리적으로 방사선 피폭선량을 최소화하는 최적화(optimization)를 제안한다(ICRP, 1990). 라돈방호는 ALARA(As Low As Reasonably Available)목표에 따라 신축 건물에서 피폭을 합리적으로 달성 가능한 낮은 수준으로 유지함을 목표로 하는 '예방'과 기존 건물에서 피폭을 합리적으로 달성 가능한 수준으로 낮춤을 목표로 하는 '완화'로 이루어진다(ICRP, 2014). 완화조치와 예방조치는

각각 실내공간내 라돈농도를, 건축자재의 라돈 원인물질을 관리함으로써 이루어진다.

① 완화조치를 통한 라돈방호

완화조치의 일환으로 WHO와 ICRP는 나라별 경제사회 여건을 고려하여 국가 유도참조준위를 $100\text{--}300\text{ Bq/m}^3$ 범위에서 방호의 최적화 원칙에 따라 합리적으로 낮게 설정할 것을 권고한다(*ICRP, 2010; WHO, 2009*). 300 Bq/m^3 은 연간 피폭선량 10 mSv 에 해당한다. 국내에서는 실내공기질 관리법에 따라 공동주택 및 다중이용시설의 실내 라돈농도 권고기준은 148 Bq/m^3 이하이다. 실내 라돈농도 측정은 실내공기질공정시험기준의 실내 공기 중 라돈 측정방법에 따라 알파비적검출법을 통해 이루어진다(*환경부, 2010*).

실내 라돈농도의 영향을 미치는 요인은 다양하고, 지역과 건물마다 원인차단에는 한계가 존재한다. 라돈저감을 위해 건물내부로 들어오는 라돈의 유입경로를 차단하고, 토양을 효과적으로 환기시킴으로써 라돈농도가 약 30% 감소하였다(*UNSCEAR, 2000*). 또한, 건물내부와 외부의 압력차를 줄여 이류의 영향 감소로 80–90%만큼 라돈농도를 저감하였고, 환기시스템의 개선은 일반적으로 라돈농도를 50%이하로 감소시킨다. 하지만, 장기적인 관점에서 라돈농도를 관리하기 위해서는 선제적인 라돈농도 관리를 위한 예방조치가 필요하다.

② 예방조치를 통한 라돈방호

예방조치의 일환으로 환경부, 원자력안전위원회, 국토교통부 관계부처 합동으로 19년 건축자재 라돈 저감·관리 지침서를 발간하여 라돈농도 저감을 위한 건축자재의 선별을 목적으로 식 (1–6)의 방사능 농도 지수 I 를 도입하여 1이하로 권고하고 있다(*환경부, 국토교통부, 원자력안전위원회, 2019*). 이는 EU의 방사선 방호 지침(*EC, 1999*)에 따라 가상의 주거환경을 가정하여, 건축자재에서 방출되는 감마선에 의한 외부피폭을 고려하여 설정된 지수로, 방사능 농도 지수 $I = 1$ 은 감마선 피폭선량이 1 mSv/년 이라는 의미이다. 또한, 방사능 농도 지수 $I = 1$ 은 실내 라돈농도 200 Bq/m^3 을 만족한 것으로 간주된다.

$I = \frac{A_{226Ra}}{300} + \frac{A_{232Th}}{200} + \frac{A_{40K}}{3000} \leq 1$	(1-6)
여기서, $A_x = x$ 핵종의 방사능농도 [Bq/kg]	

방사능 농도 지수는 표준화된 분석법을 갖는다는 장점이 존재하지만(ISO 18589-3, 2007), 라돈의 모핵종인 ^{226}Ra 을 고려하는 간접적 방식으로, 방사능농도지수를 이용한 건축자재의 선별은 실내의 낮은 라돈농도를 담보하지 못한다. 기체인 라돈의 특성상 측정조건에 따른 방출률의 변화가 커, 현재 국제적으로 표준화된 측정법이 개발되지 않았지만, 건축자재의 선별을 목적으로 라돈방출률의 사용은 실내 라돈농도와 직접적인 관련성을 갖는다는 측면에서 실질적인 예방조치라 여겨진다. 또한, 국가 라돈방호 전략은 장기적인 관점에서 수립되어야 함과 건물 설계 단계부터 예방대책을 이행하는 것이 전체적 집단을 방호하는데 가장 비용효과적으로 간주된다는 사실을 고려하면 라돈방출률의 표준측정법 정립은 필수적이다 (ICRP, 2014).

8. 라돈방출률 측정방법

^{226}Ra 으로부터 생성된 라돈은 퇴흙에 의해 공극으로 방사되고, 확산과 이류의 두가지 기작으로 공극 내에서 수송되어 결국 시료의 표면으로 이동되면 공기중으로 방출된다. 라돈방출률(Radon Exhalation rate)은 단위면적당 단위시간당 시료로부터 방출되는 라돈의 방사능으로 $\text{Bq m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 의 단위를 갖는다. 주로 활용되는 측정법은 라돈방출률이 낮은 물질인 천연방사성물질에 대한 측정 불확도 측면에서 장점을 가진 밀폐챔버법(closed chamber method)으로 라돈을 포집(accumulation)하여 측정하기 때문에 포집법(accumulation method)으로도 불린다.

토양에서의 라돈방출률의 경우, 표준측정법에 따라 한쪽 면이 개방된 밀폐챔버를 토양의 표면에 일정 깊이 삽입하여 표면방출률을 측정한다(*ISO 11665-7, 2012*). 토양의 라돈방출률 측정방법에 대해서는 표준측정법이 정립되어 있지만, 건축자재의 라돈방출률에 대한 표준측정법은 정해져 있지 않다. 토양의 수분함량이 0에 가깝다고 가정할 때, 라돈방출률 E 은 라돈의 생성률 f , 시료의 공극률 ϵ , 라돈의 시료내 확산거리 l 에 의해 결정되어, 토양과 같은 반 무한평면 체적의 시료에서 식 (1-7)과 같이 표현된다. 또한, 유한한 두께를 갖는 건축자재의 경우 한쪽 면으로 방출되는 라돈방출률은 식 (1-8)과 같이 표현된다. 이에 대한 유도는 제 3 절 라돈 확산방정식에서 추가적으로 논의한다.

$E = f\epsilon l$	(1-7)
<p>여기서, $f =$ 라돈의 생성률 [$\text{Bq m}^{-3} \text{h}^{-1}$] $\epsilon =$ 시료의 공극률 [] $l =$ 라돈의 시료내 확산거리 [m]</p>	

$E = f\epsilon l \tanh\left(\frac{l}{L}\right)$	(1-8)
<p>여기서, $L =$ 건축자재의 두께의 절반 [m]</p>	

토양과 건축자재의 라돈방출률 차이는 건축자재의 유한의 두께로 인한 확산 유효부피(effective volume) 차이에 기인한다. 즉, 충분히 두꺼운 건축자재의 경우($l \gg L$), 같은 물질에 대해서 두 식은 같아진다. 이는 같은

물질로 이루어진 건축자재여도 두께에 따라 라돈방출률의 차이에 기여하는 주요한 요인이다(*UNSCEAR 2000*). 일반적인 건축자재의 확산거리는 벽이나 바닥의 두께보다 더 크기 때문에, 건축자재에서 생성되는 라돈이 모두 공기 중으로 방출될 수 있지만, 충분한 두께를 갖는 건축자재의 라돈방출률 보다 더 작게 평가된다.

제 2 절 연구의 목적 및 필요성

실내공간에서 라돈흡입으로 인한 내부피폭에 대한 방사선방호는 장기적관점에서 예방조치로서 건축자재에 대한 방사능농도지수를 도입하여 관리하지만, 방사능농도지수의 경우 실내 라돈농도와 직결되지 않는다. 예방조치로서 라돈방출률에 대한 고려도 있었지만, 건축자재 라돈방출률 표준측정법의 부재로 실질적인 방호조치로 이행되지 못하고 있다. 국내와 해외에서도 라돈방출률 측정에 대한 연구는 활발히 진행되고 있다. 하지만, 건축자재의 경우, 그림 6과 같이 부피방출 방식과 표면방출 방식의 2가지 라돈방출률 측정법으로 나뉜다. 세계적으로 건축자재에 대한 라돈방출률 연구는 수 십년동안 활발하게 이루어졌지만 밀폐챔버법의 측정방식의 차이가 존재하여, 지역에 따른 건축자재의 라돈방출률 값에 대한 비교의 어려움이 존재하였으며, 측정방식 차이에 따른 라돈방출률에 대한 연구는 존재하지 않았다.

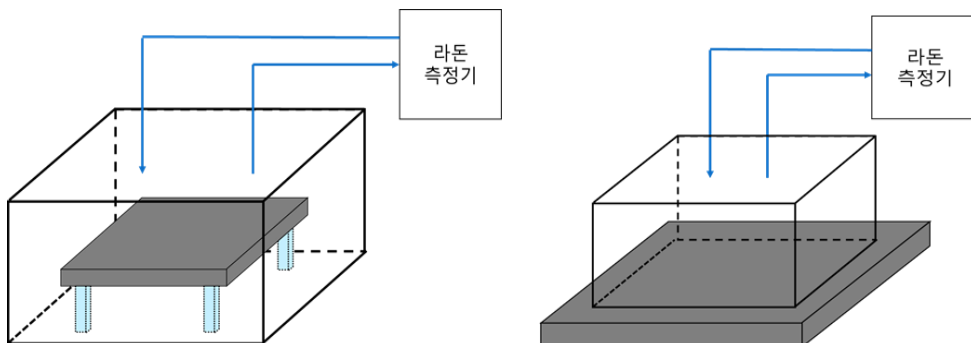


그림 6. 라돈의 부피방출률(좌)과 표면방출률(우) 측정 모식도

먼저, 부피방출 방식 라돈방출률 측정법은 건축자재를 밀폐챔버 안에 둔 채로 6면에서 방출되는 라돈의 부피방출률을 측정한다(*N Jonassen, 1980; C Samuelsson, 1990; CY Chao, 1997; M Jang 2005; M Abo-Elmagd, 2014*). 표면방출 방식 라돈방출률 측정법은 건축자재의 한쪽면을 한쪽면이 개방된 밀폐챔버에 부착시킨 채로 라돈의 표면방출률을 측정한다(*CJ Chen, 1993; J Chen, 2010; A Kumar, 2015*). 두가지 방식은 건축자재의 선별을 목적으로 부피방출률을 측정하거나 실험실에서 측정된 표면방출률로부터 실제 건축물에서 벽이나 바닥으로부터 방출되는 표면방출률을 도출한다는 측면에서 각각 의미를 갖는다.

라돈방출률의 경우, 단위면적 당 단위시간 당 방출되는 라돈의 방사능이지만, 부피방출률과 표면방출률은 3차원과 1차원으로 방출되는 라돈의 방출률이기 때문에, 건축자재의 크기와 확산거리에 따라 이론적, 실험적으로 다른 결과값을 나타낸다. 조사한 선행연구에 따르면 부피방출, 표면방출 방식의 라돈방출률 차이에 대한 언급은 있었지만(*CYChao, 1997; L Morawska, 2021*), 실질적인 차이에 대한 연구는 진행되지 못하였다.

따라서, 표면방출, 부피방출 방식의 라돈방출률을 비교할 수 있는 실험을 구성하여, 측정방식에 따라 라돈방출률의 차이가 발생함을 보이고, 방출면적을 조절함으로써 그 원인을 규명하는 연구를 진행하였다. 측정방식에 대한 근본적인 차이를 밝혀, 장기적으로 건축자재의 라돈방출률 표준측정법 정립에 기여하고자 한다.

제 2 장 연구내용 및 방법

본 연구에서는 표면방출률과 부피방출률 측정방식에 대한 차이를 밝히기 위해, 표면방출률과 부피방출률을 동시에 측정하는 시스템을 구성하였다. 또한 표면방출 면적을 조절하여 방출면적에 따른 라돈방출률을 평가하였다. 이때, 라돈방출률은 여러가지 인자에 영향을 받기 때문에, 측정의 반복성과 재현성을 확보하였다. 이를 위한 실험절차는 그림 7과 같이 세단계의 예비실험과 본실험을 포함해 총 4단계로 구성된다. 먼저, 2대의 RAD7을 동시에 사용하기 위해 측정기의 교정작업을 진행하였다. 두번째로, 자체제작한 측정챔버에 대해서 건전성을 확인해 라돈방출률이 과대평가되지 않도록 누기율을 도출하는 실험을 진행하였다. 이와 동시에, 측정챔버에서 측정기로 흡입되는 라돈 흡입구 높이에 따른 차이를 확인하는 실험을 진행하였다. 세번째로, 시료 베이킹을 통해 수분함량 및 다른 변인들을 통제하여 측정의 반복성과 재현성 확보 실험을 진행하였다. 또한, 전처리된 시료를 측정챔버에 넣고, 챔버의 질소퍼징을 통해 초기 라돈농도와 챔버 내부 습도를 0에 가깝게 통제하였다. 최종적인 본 실험으로, 부피방출 방식에서 부피방출률을 측정하고, 표면방출방식에서 방출면적을 조절하여 실험을 진행하였고, 표면방출 조건에서 2층 챔버만 측정 중에 질소퍼징한 상황에서 실험을 진행하였다. 구체적인 내용은 아래에서 세부적으로 다룬다.

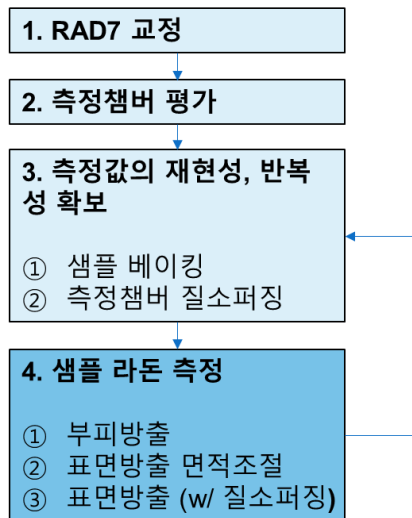


그림 7. 라돈방출률 측정을 위한 측정절차 순서도

제 1 절 실험재료 및 장비

1. 라돈측정챔버

본 연구에서는 라돈방출률에 영향을 줄 수 있는 주요인자 중, 라돈 방출면적과 측정방식을 고려하여 라돈방출률을 비교 분석하였다. 이를 위해서, 그림 8과 같이 총 2층으로 구성된 라돈측정챔버를 제작하였다. 챔버 내부와 외부의 기체의 교환을 막기 위해, 두께 1 cm의 아크릴로 밀폐챔버를 제작하였다. 챔버의 크기는 $32.5 \times 27 \times 64 \text{ cm}^3$ 이고 챔버의 2층과 1층은 각각 $30.5 \times 25 \times 32 \text{ cm}^3$, $30.5 \times 25 \times 29 \text{ cm}^3$ 의 크기를 갖는다. 이때, 챔버 2층과 1층 사이 경계창에는 직경 7.5 cm의 구멍이 뚫려 있다. 경계창의 구멍 바깥쪽으로 P85 규격(직경 약 85 mm)의 고무링이 그림 9와 같이 시료를 경계창에 올려 두었을 때, 챔버를 2층과 1층으로 분리한다. 경계창과 시료를 이격하여 배치할 경우, 그림 13과 같이 시료의 부피방출률의 측정이 가능하며, 경계창에 시료를 밀착하여 올려둘 경우, 그림 14와 같이 챔버 1층으로의 표면방출률이 측정 가능하다. 챔버 2층과 1층 사이의 방출면적조절과 챔버 2층과 1층 분리를 위해, 그림 9와 같은 총 4개의 아크릴판을 추가적으로 활용하였다. 아크릴판의 아랫면에는 P85 고무링을 끼우기 위한 홈을 내서 진공구리스를 도포하여 결합하였다. 아크릴판의 윗면에는 구멍이 안 뚫린 아크릴판 1개 다른 규격(직경 65, 45, 25 mm)의 고무링을 장착한 아크릴판 3개를 사용하였다.

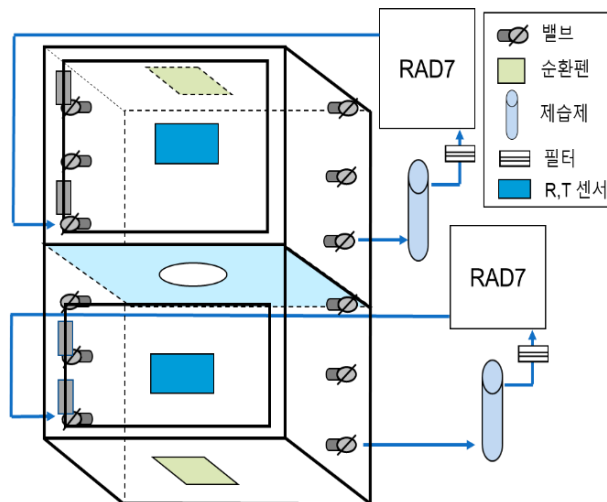


그림 8. 챔버의 1층과 2층을 통해 각각 표면방출률과 부피방출률 측정이 가능한 라돈측정챔버 모식도

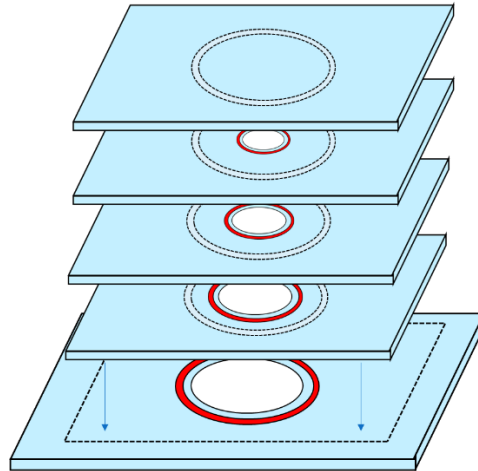


그림 9. 라돈 방출면적 조절(직경 65 mm, 45 mm, 25 mm)과 챔버 1, 2층 분리를 위해 제작된 아크릴판 모식도

2. RAD7 측정기

DURRIDGE의 RAD7은 실시간으로 라돈과 토론의 농도를 측정가능한 능동형 측정장치로 우리나라에서 환경부 형식승인 제IAMS-2020-4호에 해당한다. RAD7은 기기에 내장된 펌프를 이용하여 미세필터를 통과한 기체를 약 8 lpm으로 RAD7의 측정챔버 내부로 순환시킨다. 이때, 라돈의 자손핵종은 필터에 의해 걸러지고 라돈기체만 내부로 들어간다. RAD7은 라돈이 아닌 흡입된 라돈에서 붕괴된 라돈 자손핵종의 알파선을 에너지구간별로 측정하여, 라돈의 농도를 도출한다. 본 실험에서 밀폐챔버의 1층과 2층에 사용한 RAD7 2대는 각각 normal 모드에서 변환인자 (conversion factor)로 72.0 (Bq/m³)/cpm, 69.7 (Bq/m³)/cpm을 갖는다.

일반적으로 알파선을 측정하기 위해, 알파선의 비정이 대기압에서 조건에서 약 10 μm 이기 때문에, 진공에서 측정시스템을 구축하거나 액체섬광계수기(LSC; Liquid scintillation counter)를 이용하여 알파선을 계측한다. 하지만, RAD7은 상압에서 알파선의 계측을 위해, 고전압을 활용한 정전기적 집진방식의 측정원리를 활용한다. 라돈은 알파붕괴 시 알파입자를 방출하고 ²¹⁸Po이 되튬(recoil)된다. 이때, 약 5.59 MeV의 Q값을 갖고, 운동량 보존의 법칙에 따라 알파선과 잔류핵인 ²¹⁸Po은 각각 약 5.49 MeV, 0.1 MeV의 운동에너지를 갖는다. 잔류핵의 되튬에너지(recoil

energy)에 의해 ^{218}Po 는 이온화되어 양이온이 된다(*J Porstendorfer, 1979*). RAD7의 측정챔버에서 라돈의 알파붕괴로 생성된 라돈의 자손핵종은 양전하를 갖고, 그림 10과 같이 고전압에 의해 반도체검출기 측정영역으로 끌려간다(*G De Simone, 2016*). 반도체검출기의 측정영역 안에서 알파붕괴한 라돈 자손핵종의 알파선이 반도체검출기에 계측되면 RAD7은 알파선을 분광분석하여 라돈의 농도를 도출한다.

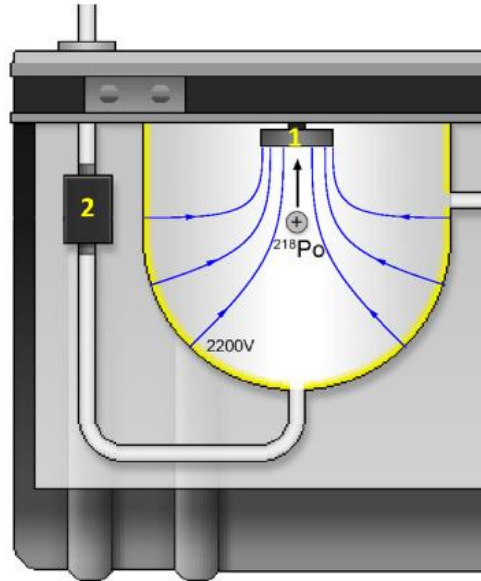


그림 10. RAD7 전기적 집진방식 라돈 측정과정 도식화

3. 라돈선원

라돈은 반감기가 약 3.8일로 짧아 교정용 라돈선원으로 직접 활용하기에는 어려움이 있다. 반면에, 비활성기체인 라돈의 모핵종 ^{226}Ra 은 고체상태이며 약 1600년의 반감기를 가져, 라돈선원으로 활용된다. 밀봉용기에 고체상태의 ^{226}Ra 으로부터 생성된 라돈을 포집하고, 라돈수송기체의 유량을 조절하여 라돈을 원하는 농도로 조절한다.

본 실험에서 국립환경과학원에 보유중인 Czech Metrology Institute의 표준라돈선원을 사용하였고, ^{226}Ra 의 방사능은 8.975 kBq 이고, 방사(emanation)계수 η 는 0.996이다. 아래의 식에 의해 운반기체의 유량에 따라 운반기체 내의 라돈농도가 결정된다.

$P = \lambda_0 \times A_{\text{Ra}} \times \eta$	(2-1)
--	-------

$A_v = \frac{P}{F/60}$	(2-2)
여기서, P = 라돈 출력 (output) [Bq/s] λ_0 = 라돈붕괴상수 [s^{-1}] A_{Ra} = ^{226}Ra 의 방사능 [Bq] η = 방사(emanation)계수 [] F = 라돈 수송기체의 유량 [lpm] A_v = 라돈 수송기체의 라돈농도 [Bq/m^3]	

4. 라돈측정기 교정용 챔버

실험값 측정을 통한 비교 분석을 위해서는 RAD7 2대에 대한 상대교정이 필수적이다. 이를 위해 국립환경과학원에 설치된 라돈측정기 교정용 챔버를 이용하여 제조사로부터 교정된 RAD7 2대에 대해 추가적인 상대교정을 진행하였다. 라돈 선원의 유량을 조절하여, 교정용 챔버 내부에 라돈농도를 일정하게 유지할 수 있다. 라돈측정기 교정에 관한 내용은 제 4 절 실험절차에서 다시 설명한다.

5. 측정시료

건축자재는 천연방사성물질에(NORM) 해당하여 상대적으로 작은 라돈방출률을 갖는다. 본 실험에 사용한 측정시료는 국립환경과학원 이 보유한 크기 $20 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$ 의 우라늄 벽돌을 활용하였다. 우라늄벽돌은 우라늄광산에서 채취한 흙으로 벽돌을 만들어서 인위적으로 라돈방출률을 크게 갖는 TENORM (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials)에 해당한다. 따라서, 본 연구에서는 방출방식과 방출면적에 따른 표면방출률과 부피방출률의 차이를 밝히기 위한 목적으로 TENORM 우라늄 벽돌을 측정시료로 활용하였다.

제 2 절 라돈 mass transfer equation

챔버 내에 라돈을 방출하는 시료가 존재할 때, 챔버 내의 라돈농도는 시간에 따라 증가하고 mass transfer equation으로 표현된다. 동시에 라돈은 방사성원소이므로 붕괴하고, 충분한 시간이 흘러 챔버 내의 라돈농도는 평형상태가 되어 일정한 값으로 수렴하게 된다. 먼저, 챔버 내의 라돈은 방사성붕괴에 따라 시간에 따라 감소하고 식 (2-3)과 같이 정의된다.

$\frac{dC}{dt} = -\lambda_0 C$	(2-3)
여기서, C = 챔버 내의 라돈농도 [$Bq \cdot m^{-3}$] λ_0 = 라돈의 붕괴상수 [h^{-1}]	

챔버 내에 라돈 선원이 존재할 경우, 라돈농도 증가에 기여하여 챔버 내의 라돈농도는 식 (2-4)와 같이 수정된다.

$\frac{dC}{dt} = -\lambda_0 C + \frac{E_0 S}{V_c}$	(2-4)
여기서, E_0 = 라돈 자유방출률 (free exhalation rate) [$Bq \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$] S = 시료의 라돈방출면적 [m^2] V_c = 라돈 분포 유효체적(시료 부피 제외) [m^3]	

하지만, 유한한 공간에서 챔버 내의 라돈농도가 커짐에 따라, 라돈방출률은 일정하지 않고 후방확산(back diffusion)에 의해 감소하여 식 (2-5)와 같이 표현된다. 후방확산에 대한 영향은 제 3 절 라돈 확산방정식에서 추가적으로 논의한다.

$E = E_0 - \mu C = E_0 - \frac{\lambda_B V_c}{S} C$	(2-5)
여기서, E = 라돈 제한방출률 (bound exhalation rate) [$Bq \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$] μ = 후방확산 계수 [$m \cdot h^{-1}$] λ_B = 후방확산 상수 [h^{-1}]	

챔버, RAD7, 연결호스 등에 측정시스템상의 누기울을 고려하면, 챔버 내부와 외부의 라돈농도에 영향을 받으며 식 (2-6) 같이 수정된다.

$\frac{dC}{dt} = -\lambda_0 C + \frac{ES}{V_c} - \frac{q(C - C_B)}{V_c}$	(2-6)
$q = \lambda_L V_c$	(2-7)

여기서, q = 측정시스템의 누기율 [$m^3 \cdot h^{-1}$]
 λ_L = 누기상수 [h^{-1}]

라돈 선원의 라돈방출률, 방사성붕괴, 후방확산, 측정시스템의 누기율을 고려하면 최종적으로 식 (2-9)와 같다.

$\lambda_{eff} = \lambda_0 + \lambda_B + \lambda_L$	(2-8)
$\frac{dC}{dt} = -\lambda_{eff} C + \frac{E_0 S + q C_B}{V_c}$	(2-9)
여기서, λ_{eff} = 유효붕괴상수 [h^{-1}]	

이에 대한 라돈 mass transfer equation의 해는 식 (2-10)과 같다.

$C(t) = C_0 \exp(-\lambda_{eff} t) + \frac{E_0 S + q C_B}{\lambda_{eff} V_c} [1 - \exp(-\lambda_{eff} t)]$	(2-10)
--	--------

본 연구에서, 밀폐챔버 내부를 질소로 퍼징하여 초기 라돈농도를 0에 가깝게 통제하여, 식 (2-11)을 이용하여 라돈의 자유방출률 E_0 를 도출하였다.

$C(t) = \frac{E_0 S + q C_B}{\lambda_{eff} V_c} [1 - \exp(-\lambda_{eff} t)]$	(2-11)
---	--------

챔버의 누기율 λ_L 및 환기율 q 는 제 4 절 실험절차의 누기율 평가 실험으로부터 도출하였다. 후방확산 상수 λ_B 는 식 (2-12)와 식 (2-13)으로부터 유도된 평형라돈농도부터 도출 가능하다. 후방확산은 시료 공극의 부피가 챔버의 부피의 10%보다 작거나 시료의 확산거리에 비해 시료의 두께가 얇을 경우, 후방확산의 효과가 작으므로(C Samuelsson, 1990), 본 실험에서는 측정시료의 크기를 고려하여, 챔버를 충분히 크게 제작하여 후방확산 상수 λ_B 를 0으로 가정하였다.

$C_E = C(\infty) = \frac{E_0 S + q C_B}{\lambda_{eff} V_c}$	(2-12)
---	--------

$$\lambda_B = \frac{E_0 S + q C_B}{C_E V_C} - (\lambda_0 + \lambda_L) \quad (2-13)$$

최종적으로 챔버의 누기율 λ_L 및 환기율 q , 후방확산 상수 λ_B , 챔버의 유효체적 V_C , 시료의 방출면적 S 을 대입하고, 식 (2-11) 을 시간-라돈농도 그래프에 피팅하여 라돈의 자유방출률 E_0 을 도출하였다.

제 3 절 라돈 확산방정식

시료에 포함된 라돈핵종 농도로부터 라돈확산방정식은 식 (2-14)와 같이 표현된다. 라돈의 방출은 방사와 수송에 의해 영향을 받으며, 고체, 액체, 기체 상에 따라 차이가 존재한다(*VC Rogers, 1991*). 본 연구에서는 시료 내부의 수분함량을 0에 가깝게 통제하고, 챔버 내의 상대습도를 0에 가깝게 통제하여, 라돈의 액체 상에서의 거동은 고려하지 않았다.

$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla(D_e \nabla C) - \frac{\kappa}{\mu} \nabla P \nabla C - \lambda C + f$	(2-14)
<p>여기서, C = 시료에 포함된 라돈핵종 농도 [$Bq \cdot m^{-3}$] D_e = 시료내 라돈의 유효확산계수 [$m^2 \cdot s^{-1}$] κ = 시료내 라돈의 투과율(permeability) [m^2] μ = 동적 점성도 [$Pa \cdot s$] P = 압력 [Pa] λ = 라돈의 붕괴상수 [h^{-1}] f = 시료내 라돈의 생성률 [$Bq \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$]</p>	

시료 내의 라돈은 ^{226}Ra 의 알파붕괴에 의해 생성된다. 생성된 라돈은 시료 격자사이의 공극으로 방사(emanation)된다. 이때, 라돈의 생성률이 확산방정식의 마지막 항인 f 로 정의된다. 라돈의 생성률 f 는 시료내 ^{226}Ra 의 방사능농도와 붕괴건조밀도 ρ , 라돈의 붕괴상수 λ , 방사계수 E_C 의 곱인 $C_{Ra}\rho\lambda E_C$ 로 결정된다. 라돈은 방사성붕괴로 시간에 따라 감소하여, 우변의 세번째 항인 시료에 포함된 라돈핵종 농도와 붕괴상수의 곱으로 결정된 양만큼 감소에 기여한다. 라돈이 생성되면 공극에서 라돈은 확산(diffusion)과 이류(convection)에 의해 이동한다. 시료내 라돈의 확산계수 D_e 와 시료내 포함된 라돈핵종 농도의 기울기에 대한 발산으로 첫번째 항과 같이 정의된다. 또한, 라돈의 이류는 압력의 기울기와 시료내 포함된 라돈핵종 농도의 기울기 곱에 비례한 값으로 결정된 양만큼 감소에 기여하여 두번째 항으로 정의된다.

1. 후방확산에 의한 자유방출률 E_0 과 제한방출률 E_* 의 관계

z 축 1차원에서, 시료의 표면적이 무한할 때, 시료에서 라돈의 표면방출에 의한 위치에 따른 라돈농도 그래프는 그림 11과 같다. 시료에 포함된 라돈핵종 농도와 시료 외부인 공기 중 라돈농도는 경계에서 연속하다고 가정할 수 있고, 본 연구에서는 시료에 포함된 라돈핵종 농도를 라돈농도로 함께 표현한다. 임의의 시료에 대한 라돈방출률은 시료내 경계에서의 라돈농도의 기울기로부터 식 (2-15)와 같이 정의된다. 정상조건(steady-state, $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$)에서, 시료 경계에서의 라돈농도 $C(z = 0)$ 는 공기 중 평형라돈농도 C_E 로 가정할 수 있다. 따라서, 측정챔버의 라돈농도로부터 라돈방출률이 도출가능하다.

$E = -\epsilon D_e \left. \frac{dC}{dz} \right _{z=L}$	(2-15)
<p>여기서, $E =$ 라돈방출률 [$Bq \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$] $\epsilon =$ 시료의 공극률 [] $D_e =$ 시료내 라돈의 유효확산계수 [$m^2 \cdot s^{-1}$] $C =$ 시료에 포함된 라돈핵종 농도 [$Bq \cdot m^{-3}$] $L =$ 시료 두께의 절반 [m]</p>	

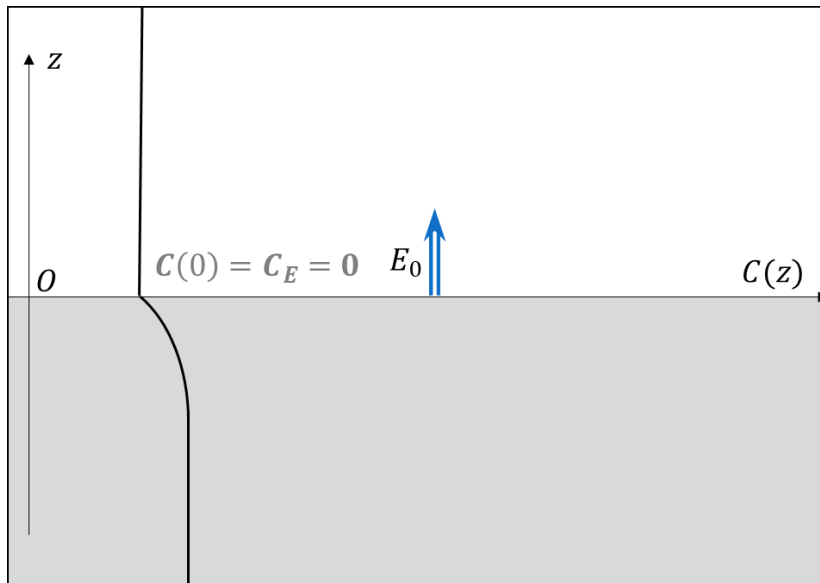


그림 11. 반무한평면의 라돈시료로부터 라돈방출률과 평형상태의 라돈농도 도식화

챔버내 라돈 이류에 기여하는 기체인 질소의 압력은 1기압 조건에서 압력의 기울기를 0으로 ($\nabla P = 0$) 가정할 수 있다. 마지막으로, 시료내의 위치에 관계없이 유효확산 계수가 균일하고 (D_e 일정), 라돈이 균일하게 생성된다고 (f 일정) 가정하면, 식 (2-14)의 확산방정식은 다음과 같이 간단히 된다.

$D_e \frac{\partial^2 C(z,t)}{\partial z^2} - \lambda C(z,t) + f = 0$	(2-16)
---	--------

위 상황에서, 경계조건

$C(0) = C_E$	(2-17)
$C(-\infty) = \frac{f}{\lambda}$	(2-18)

을 고려한 식 (2-16)에 의한 시료에 포함된 라돈핵종 농도와 공기 중 라돈농도는 각각 식 (2-19)와 식 (2-20)과 같이 표현된다.

$C(z) = \frac{f}{\lambda} \left(1 - \exp\left(\frac{z}{l}\right)\right) + C_E \exp\left(\frac{z}{l}\right)$	$z \leq 0$	(2-19)
$C(z) = C_E$	$z \geq 0$	(2-20)

여기서, $l = \sqrt{\frac{D_e}{\lambda}}$: 시료내 라돈의 확산거리 [m]
--

시료의 라돈방출률은 식 (2-14)에 의해 다음과 같다.

$E = \epsilon l f - \epsilon l \lambda C_E$	(2-21)
---	--------

위 상황에서, 라돈의 방출은 무한공간에서 발생하므로, 평형라돈농도 C_E 는 자연순환에 의해 0으로 가정할 수 있다 (*R Colle, 1981*). 따라서, 라돈방출률은 다음과 같이 정의되고,

$E_0 = \epsilon l f$	(2-22)
----------------------	--------

이 때의 라돈방출률을 E_0 자유방출률 (free exhalation rate)이라 한다. 자유방출률은 시료의 공극률, 라돈생성률, 시료내에서의 라돈의 확산거리에 비례하는 재료의 특성으로 결정된다.

다음으로 밀폐챔버를 라돈시료의 표면에 밀착시켜 라돈을 챔버 내에

포집(accumulation)하여 측정할 때, 위치에 따른 라돈농도는 그림 12와 같다. 시료의 크기가 밀폐챔버에 비해 충분히 클 때, 표면방출에 의한 라돈방출률은 1차원으로 가정할 수 있다. 또한, 챔버 내의 평형라돈농도는 충분히 섞여 라돈농도의 기울기가 없다고 가정한다. 밀폐챔버에 의해 실측된 라돈방출률을 E_* 제한방출률(bound exhalation rate)이라 하고 식 (2-22)와 달리 다음과 같이 정의된다.

$E_* = \epsilon l f - \epsilon l \lambda C_E$	(2-23)
---	--------

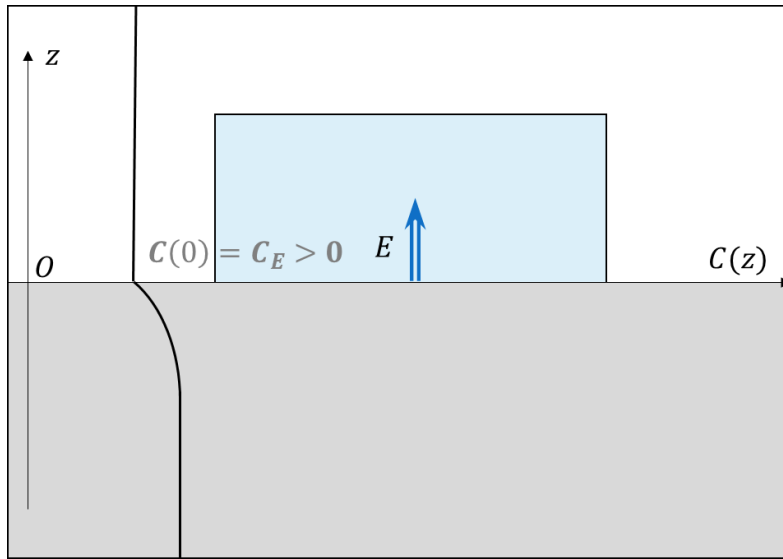


그림 12. 밀폐챔버와 반무한평면의 라돈시료로부터 라돈방출률과 평형상태의 라돈농도 도식화

제한방출률 E_* 은 자유방출률 E_0 보다 작으며, 이는 챔버 내의 라돈의 농도가 높을 때, 시료의 내부와 챔버 내의 라돈농도 기울기가 작아져, 식 (2-15)의 확산항에 기여가 작아지기 때문이다. 이 같은 현상은 후방확산(back diffusion)으로 일컬어진다.

식 (2-22) 과 식 (2-23)을 식 (2-5)와 연립하면,

$\mu = \epsilon l \lambda$	(2-24)
----------------------------	--------

후방확산계수 μ 는 시료의 공극률과 시료내에서 라돈의 확산거리 l 에 곱인 시료내의 공극의 부피에 비례한 값으로 결정된다. 이는, 시료 내에서 확산거리가 클수록, 공극률이 클수록 식 (2-15)에서 확산에 의한 영향이 커져 후방확산의 영향이 커짐으로 해석할 수 있다.

추가적으로, 위 상황에서 평형상태를 고려할 때,

$ES = C_E V_c \lambda$	(2-25)
여기서, $V_c =$ 챔버의 부피 [m^3] $S =$ 챔버로 포집되는 라돈 방출 면적 [m^2]	

을 고려한 식 (2-16)에 의해 도출된 시료에 포함된 라돈핵종 농도는 다음과 같다.

$C(z) = \frac{f}{\lambda} \left(1 - \frac{\exp\left(\frac{z}{l}\right)}{1 + \frac{\epsilon l}{h}} \right)$	$z \leq 0$	(2-26)
---	------------	--------

라돈의 제한방출률은 식 (2-14)에 의해 다음과 같고,

$E_* = \frac{\epsilon l f}{1 + \frac{\epsilon l}{h}}$	(2-27)
---	--------

식 (2-22)의 자유방출률과 비교했을 때, 식 (2-28)과 같이 $h/(h + \epsilon l)$ 의 비율을 갖는다. 이는 챔버의 부피 (Sh)와 챔버 부피에 확산거리에 해당하는 깊이의 공극부피 (ϵSl)를 합산한 값의 비로 결정된다. 챔버의 부피가 공극의 부피보다 충분히 클 때, 후방확산의 영향이 작아져, 제한방출률 E_* 은 자유방출률 E_0 에 근사하게 된다(*R Colle, 1981; C Samuelsson, 1990*).

$\frac{E_*}{E_0} = \frac{h}{h + \epsilon l}$	(2-28)
--	--------

2. 라돈의 표면방출률과 부피방출률

라돈방출률을 2가지 방법으로 측정하였다. 그림 13과 같이 챔버 내에 시료를 위치시키고, 시료의 모든 면에서 3차원으로 방출되는 라돈방출률을 부피방출률로 정의하였다. 또한, 그림 14와 같이, 시료 아래 한쪽 면에서 챔버의 1층에 1차원으로 방출되는 라돈방출률을 표면방출률로 정의하였다.

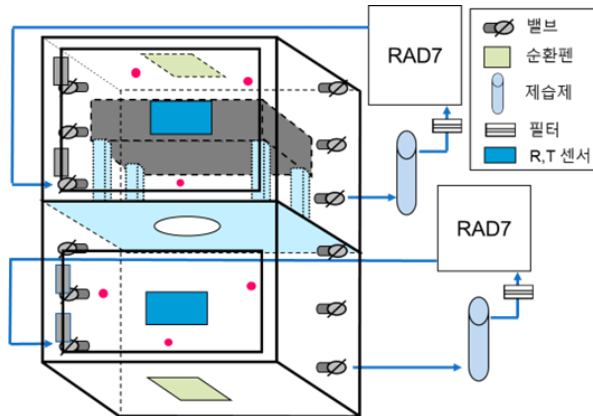


그림 13. 부피방출 방식으로 측정되는 라돈의 부피방출률 측정 모식도

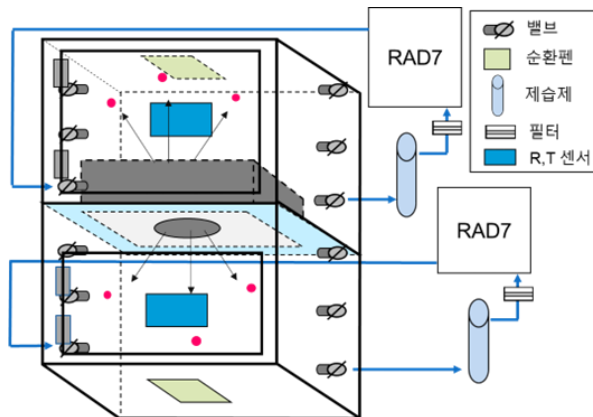


그림 14. 표면방출 방식으로 측정되는 라돈의 표면방출률 측정 모식도

2.1. 라돈의 부피방출률

부피방출률을 계산하기 위해 그림 13의 상황을 그림 15와 같이 도식화하였다. 시료의 부피와 챔버의 유효부피는 각각 V_s , V_c 이고, 시료의 두께가 $2L$, 시료의 전체면적을 S , 윗면적과 아랫면적은 $\gamma S/2$ 에 해당한다. 여기서, γ 는 시료의 위 아래면적의 합과 전체면적의 비이다.

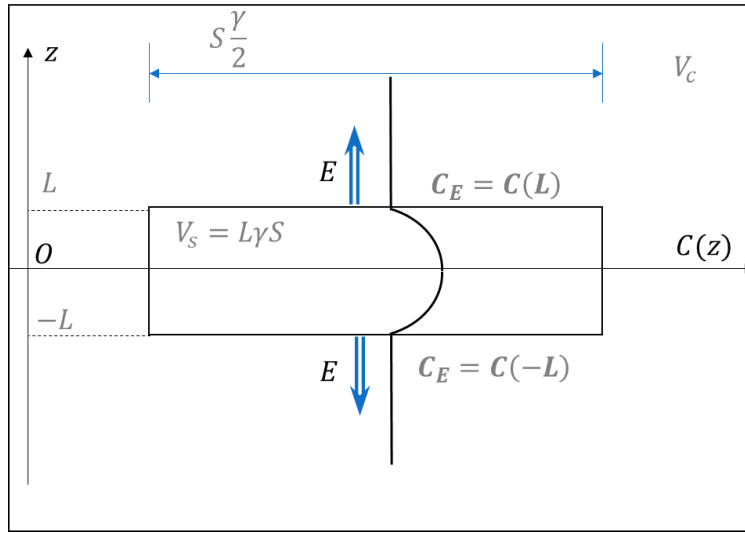


그림 15. 부피방출률 측정과 평형상태의 라돈농도 도식화

식 (2-16)과 아래의 경계조건을 이용하면,

$C_E = C(L) = C(-L)$	(2-29)
----------------------	--------

시료 내에서의 라돈핵종 농도를 도출할 수 있다.

$C(z) = \frac{f}{\lambda} \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{z}{L}\right)}{\cosh(\beta)} \right) + C_E \frac{\cosh\left(\frac{z}{L}\right)}{\cosh(\beta)}$	$-L \leq z \leq L$	(2-30)
---	--------------------	--------

여기서, $\beta = \frac{L}{l}$ []

식 (2-14)에 의해 라돈의 제한방출률은 다음과 같이 도출된다.

$E_* = \epsilon l f \tanh(\beta) \left(1 - \frac{\lambda}{f} C_E \right)$	(2-31)
--	--------

후방확산에 의해, 식 (2-23)과 마찬가지로 평형라돈농도 C_E 가 클수록 제한방출률은 작아진다.

추가적으로, 아래의 평형상태 조건에 따라,

$ES = C_E V_c \lambda$	(2-32)
------------------------	--------

시료내에서의 라돈핵종 농도를 식 (2-16)으로부터 도출할 수 있고,

$C(z) = \frac{f}{\lambda} \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{z}{l}\right)}{\cosh(\beta)} \right) + C_E \frac{\cosh\left(\frac{z}{l}\right)}{\cosh(\beta)}$	$-L \leq z \leq L$	(2-33)
---	--------------------	--------

식 (2-14)에 의해 라돈의 제한방출률은 다음과 같이 도출된다.

$E_* = \epsilon l f \frac{\tanh(\beta)}{1 + \frac{\tanh(\beta)}{2\alpha\beta\gamma}}$	(2-34)
---	--------

여기서, $\alpha = \frac{V_c}{\epsilon V_s}$, 챔버의 유효부피와 시료의 공극부피의 비 []

챔버의 부피가 시료 공극의 부피보다 충분히 클 때 ($V_c \gg \epsilon V_s, \alpha \rightarrow \infty$), 제한방출률 E_* 은 자유방출률 E_0 에 근사하게 되고 식 (2-35)와 같다. 이는 식 (2-31)에서 평형라돈농도 C_E 가 0일 때 식 (2-35)의 자유방출률 E_0 와 같은 결과를 보인다.

$E_0 = \epsilon l f \tanh(\beta)$	(2-35)
-----------------------------------	--------

라돈의 시료 내 확산거리에 비해 충분히 두꺼운 시료의 경우 ($l \gg L$), 라돈이 반무한평면에서 방출된다고 가정할 수 있다. 이때, 식 (2-35)에서 임의의 시료의 라돈방출률은 식 (2-22)의 토양과 같은 시료의 라돈방출률과 동일하다. 하지만, 일반적으로 건축자재의 두께는 확산거리보다 작고 확산 유효부피에 해당하는 깊이만큼 $\tanh\left(\frac{l}{L}\right) \leq 1$ 의 비만큼 작은 양의 라돈방출률을 나타낸다. 따라서, 같은 시료에서 건축자재의 두께 및 건축자재의 부피대비 표면적에 따라 확산 유효부피(effective volume)가 달라져 라돈방출률이 다르게 나타날 수 있다.

2.2. 라돈의 표면방출률

표면방출률을 계산하기 위해 그림 14의 상황을 그림 16과 같이 도식화 하였다. 챔버 2층과 1층의 유효부피는 각각 V_u, V_d 이고, 챔버 1층의 라돈농도에 기여하는 면적이 S_d , 시료 전체면적 S 에서 S_d 만큼 제외한 시료의 면적이 S_u 에 해당한다. 또한, 챔버 2층과 1층 쪽으로의 라돈방출률은 각각 E^u, E^d , 챔버 2층과 1층의 평형라돈농도는 각각 C_E^u, C_E^d 이다.

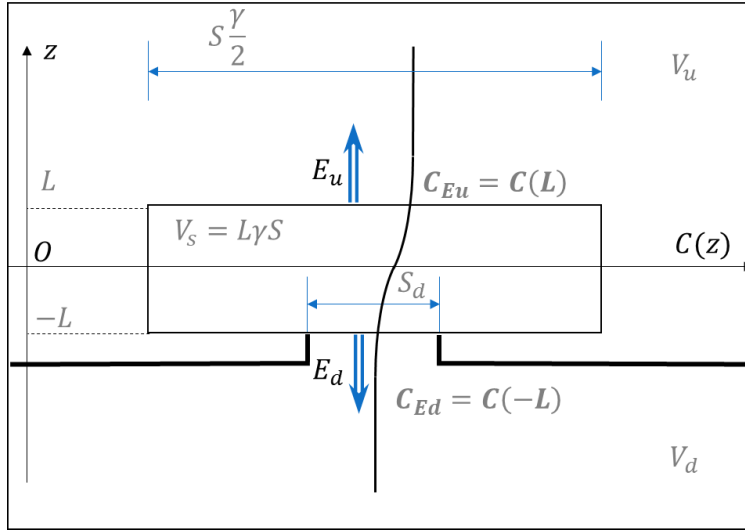


그림 16. 표면방출률 측정과 평형상태의 라돈농도 도식화

식 (2-14)와 식 (2-16), 아래의 경계조건을 이용하면,

$C_E^u = C(L)$	(2-36)
$C_E^d = C(-L)$	(2-37)

시료 내에서의 라돈핵종 농도를 도출할 수 있고, 챔버 1층으로의 표면방출률과 챔버 2층으로의 라돈방출률은 각각 식 (2-38), 식 (2-39)와 같다.

$E^d = \epsilon\lambda \left[\frac{f}{\lambda} \tanh(\beta) - \frac{C_E^d}{2} [\coth(\beta) + \tanh(\beta)] + \frac{C_E^u}{2} [\coth(\beta) - \tanh(\beta)] \right]$	(2-38)
$E^u = \epsilon\lambda \left[\frac{f}{\lambda} \tanh(\beta) + \frac{C_E^d}{2} [\coth(\beta) - \tanh(\beta)] - \frac{C_E^u}{2} [\coth(\beta) + \tanh(\beta)] \right]$	(2-39)

1층챔버로의 표면방출률 E^d 은 평형상태에서 1층챔버의 평형라돈농도 C_E^d 가 높을수록 작아지며, 2층챔버의 평형라돈농도 C_E^u 가 높아질수록 커진다. 반대로, 2층챔버로의 표면방출률 E^u 은 평형상태에서 2층챔버의 평형라돈농도 C_E^u 가 높을수록 작아지며, 1층챔버의 평형라돈농도 C_E^d 가

높아질수록 커진다. 이는 라돈 표면방출률이 측정조건에 따라 달라지는 원인에 기여하며, 표면방출률 측정 시, 시료의 측정면 반대쪽의 라돈농도에 따라 표면방출률의 과대평가를 야기할 수 있다.

평형라돈농도 C_E^d, C_E^u 가 0일 때, 표면방출에 의한 식 (2-40)과 같이 자유방출률 E_0^u, E_0^d 에 해당하고, 이는 표면방출에 의한 자유방출률 E_0 , 식 (2-35)와 같은 결과를 나타낸다.

$E_0^d = E_0^u = \epsilon l f \tanh(\beta)$	(2-40)
---	--------

제 4 절 실험절차

실험절차는 그림 7과 같이 세단계의 예비실험과 본 실험을 포함한 총 4단계로 구성된다. 예비실험을 위한 세단계는 RAD7 교정, 측정챔버 평가, 측정값의 재현성 및 반복성 확보에 해당하며, 본 실험에서는 부피방출률 평가, 표면방출률 평가, 측정 중 챔버 2층을 질소퍼징하여 표면방출률을 평가하였다.

1. RAD7 교정

RAD7은 제작회사로부터 교정이 완료된 제품이며, 국내에서는 환경부 형식승인이 완료된 제품에 해당한다. 측정 전 측정기에 대한 교정은 필수적이며, RAD7 2대의 측정값에 대한 차이를 통제하기 위해 RAD7 2대에 대한 상대적인 교정을 진행하였다. RAD7 교정에 사용된 시스템은 그림 17과 같다. 표준 라돈선원으로부터 교정용 챔버로 주입하는 라돈기체의 유량을 유량계로 통제하여, 교정용 챔버의 라돈농도를 식 (2-2)에 따라 일정하게 유지하였다.

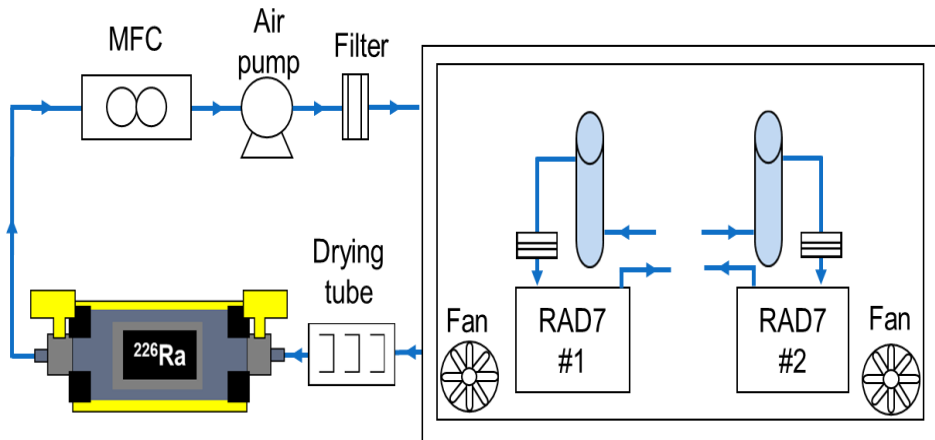


그림 17. 라돈선원과 교정용챔버를 이용한 RAD7 교정 모식도

교정농도는 측정하는 시료의 라돈방출률을 고려해, 925, 500, 200 Bq/m³ 와 배경라돈농도 (50 Bq/m³ 미만)로 설정하였다. 각농도에서 50시간 이상 측정하였으며, 측정 시 교정용 챔버 내에 RAD7 2대의 라돈 흡입구 배출구를 각각 같은 위치에 설치하였다.

표준라돈선원의 라돈기체 유량을 조절하여 교정용 챔버에서 925, 550, 200 Bq/m³로 교정농도를 RAD7 2대로 측정된 결과는 그림 18, 그림 19와

같다. 교정농도와 측정농도의 차이는 교정용 챔버의 밀폐가 완전히 이루어지지 않아 발생하였다. 하지만, RAD7은 절대교정이 완료된 상태로, 본 실험의 목적을 달성하기 위해 RAD7 2대의 측정값 차이 보정을 위해 상대교정을 진행하였다.

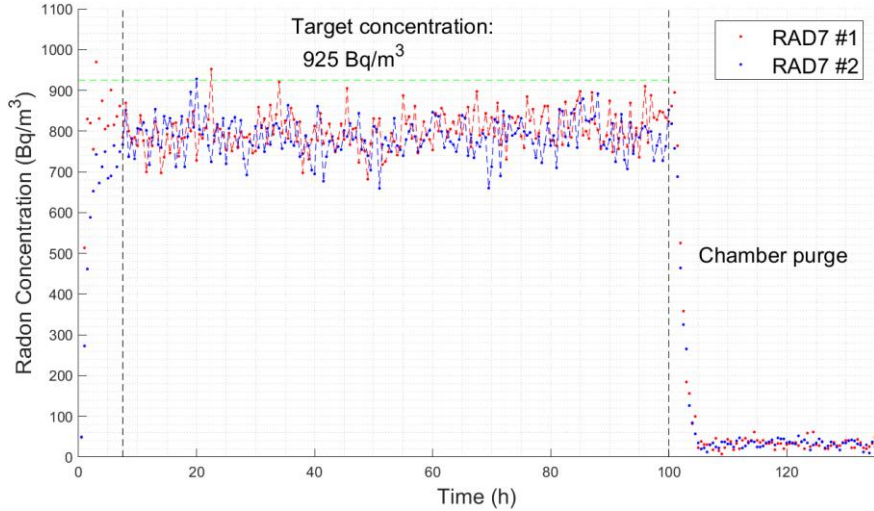


그림 18. 925 Bq/m³에서 RAD7 2대 상대교정 시 측정 농도 그래프

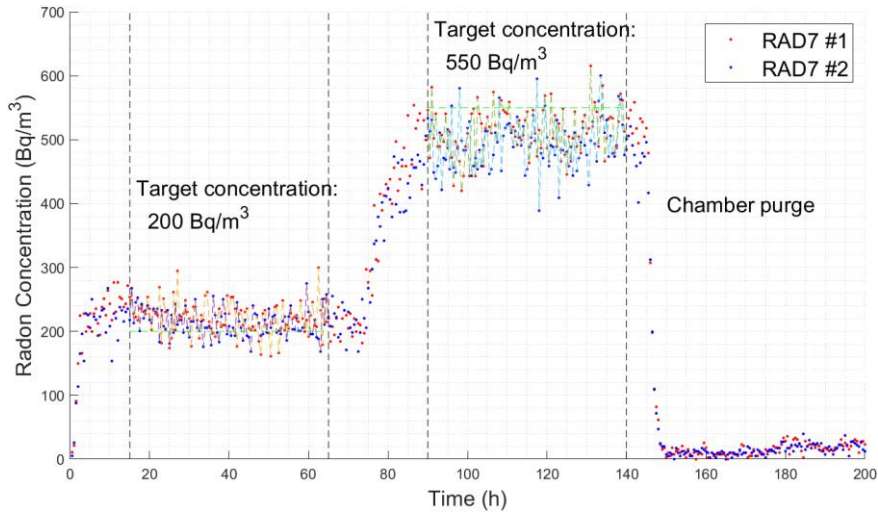


그림 19. 200, 550 Bq/m³에서 RAD7 2대 상대교정 시 측정 농도 그래프

상대교정 결과는 그림 20과 표 1과 같다. 배경 라돈농도를 포함한 총 5개의 교정농도에 대해서 1번 RAD7에 대한 2번 RAD7의 측정값의 비를 구하였다. 측정값의 비에 대한 평균은 0.9763이다. RAD7의 인증서에 제공된 교정인자(Calibration factor [(Bq/m³)/cpm]) 기준 1번 RAD7 대비 2번 RAD7의 교정인자의 비는 0.9652이다. 본 연구에서는 실험값을 기준으로 RAD7 1번에 대해 0.9763으로 상대교정값을 적용하였다.

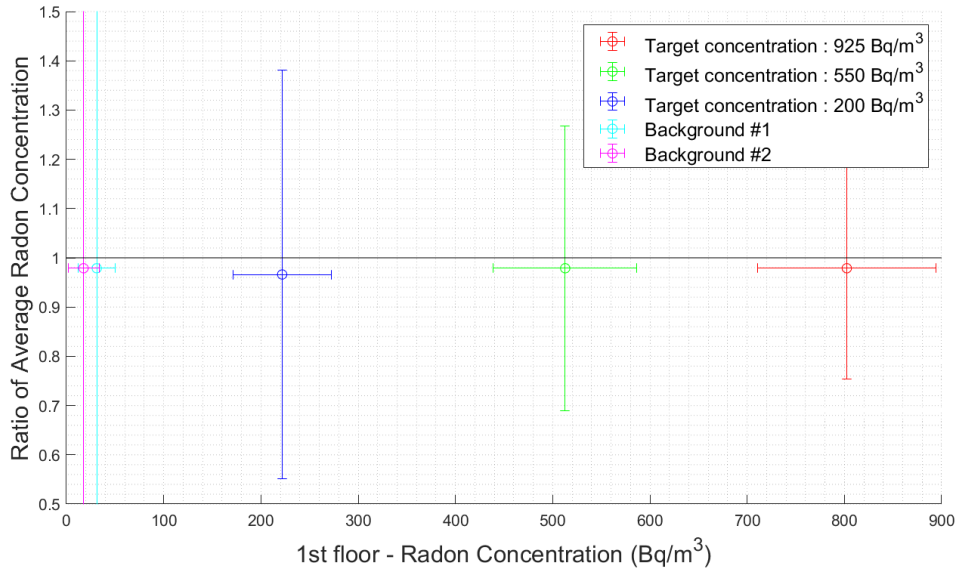


그림 20. 교정농도에 따라 RAD7 1번에 대한 2번의 측정된 평균라돈농도 비

표 1. 교정농도에 따라 측정농도 평균값과 측정시간, 측정값의 비

교정농도 [Bq/m ³]	측정농도 평균값 [Bq/m ³]	측정시간 [h]	RAD7 1번에 대한 2번의 측정값 비
925	793.95	65	0.9788
550	503.32	50	0.9788
200	218.07	50	0.9661
배경라돈	30.65	50	0.9788
배경라돈	17.41	50	0.9788

2. 측정값 보정을 위한 측정챔버 평가

측정챔버 평가는 3가지 사항에 대해 진행하였다.

- 챔버 누기율(λ_L) 평가
- 챔버 1, 2층 분리 시, 라돈농도 분리 확인
- 챔버 측정 높이별 라돈농도 차이 평가

이를 위해, 총 2가지의 실험을 진행하였다. 먼저, 챔버 2층과 1층의 경계창의 방출구멍을 막지 않아 기체 교환이 일어나는 상황에서 챔버 전체의 누기율과 챔버 측정 높이별 라돈농도 차이를 평가하였다. 챔버 내에 라돈기체를 충분히 주입한 후, 반나절 이상 챔버 내부 팬을 가동해 챔버 내부 라돈농도를 높이에 관계없이 균일하게 되도록 조절하였다. 이후, 챔버 2층과 1층에서 얻은 라돈농도의 차이가 평균농도 보다 5% 이하로 연속해서 3번 이상 유지된 후, 팬의 가동을 중단하였다. 이를 통해, 1층과 2층의 라돈농도 측정값의 시간에 따른 차이가 발생하는지 확인하였다.

라돈은 방사성붕괴핵종으로 밀폐챔버 내에서 시간에 따라 식 (2-41)과 같이 방사성붕괴상수의 지수함수로 감소한다. 하지만, 실제로 밀폐챔버 내의 라돈은 식 (2-42)와 같이 붕괴상수와 누기율의 합산으로 농도가 감소한다. 따라서 시간-라돈농도 그래프에서 식 (2-42)을 이용하여 챔버의 누기율을 도출할 수 있다.

$C = C_0 \exp(-\lambda_0 t)$	(2-41)
$C = C_0 \exp\{-(\lambda_0 + \lambda_L)t\}$	(2-42)

챔버 전체에 대해 누기율 평가 결과는 그림 21과 같다. 측정을 시작한 후, 약 15시간이 경과한 후, 밀폐챔버에 라돈기체를 주입하였다. 이후 챔버 1층과 2층에 라돈농도가 균일해지도록 팬을 계속 가동하였다. 챔버 1층과 2층에서 라돈농도의 상대오차가 5%이내로 3번이상 측정된 것을 확인한 후, 팬의 가동을 멈췄다. 라돈의 밀도는 표준상태에서 9.73 g/L로 표준상태의 공기의 밀도 1.29 g/L 보다 약 8배 무겁다. 따라서, 시간 경과에 따라 챔버에서 RAD7으로 라돈의 흡입구 높이에 따라 라돈농도의 차이가 발생할 수 있다. 하지만, 라돈의 공기 중 확산거리는 약 2.2m이고 (AK Narula, 2009), 챔버의 높이가 0.64 cm 이므로, 본 실험에 사용된 챔버 내에서

라돈농도의 높이에 따른 차이는 없음을 확인하였다. 또한, 식 (2-42)으로부터 도출된 챔버 전체의 누기율 λ_L 은 $1.51 \times 10^{-3} [\text{h}^{-1}]$ 이다.

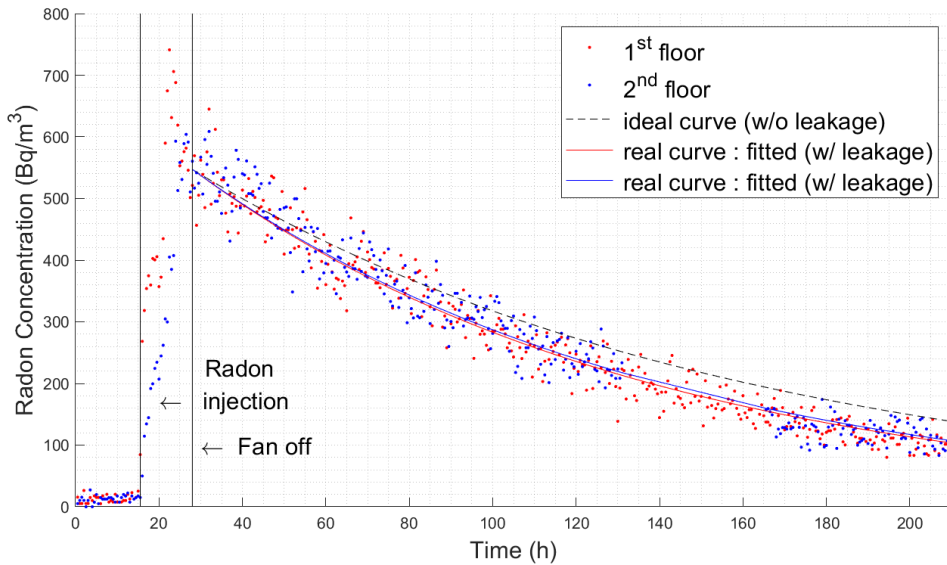


그림 21. 챔버 전체 누기율 평가 실험의 시간에 따른 라돈농도 그래프

두번째 실험에서는, 아크릴창을 이용해 챔버 1층과 2층의 경계창의 방출구멍을 막은 상황에서, 챔버 1, 2층 라돈농도 분리를 확인하고, 챔버 1층과 2층의 누기율을 각각 평가하였다. 방출구멍이 막힌 상황에서, 챔버 1층에만 라돈선원을 주입하여, 라돈농도 분리를 하루 정도 확인하고, 이후 챔버 2층에도 라돈선원을 주입하여, 챔버 누기율을 각각 평가하였다.

챔버 1층과 2층의 누기율 λ_L 평가 결과는 그림 22 및 표 2와 같다. 밀폐챔버 1층과 2층을 아크릴판으로 분리하여 실험을 진행하였다. 측정시간이 0시간 일 때, 챔버 1층에만 라돈기체를 주입하였으며, 챔버 1층과 2층이 분리되는 것을 확인한 후, 약 20시간 후 챔버 2층과 1층에 라돈기체를 각각 주입하여, 챔버의 누기율 λ_L 을 각각 동시에 평가하였다. 식 (2-42)으로부터 도출된 챔버 2층과 1층의 누기율 λ_L 은 각각 3.40×10^{-3} , $1.00 \times 10^{-3} [\text{h}^{-1}]$ 이다. 실험에서 도출된 누기율 λ_L 을 라돈의 부피방출률 평가 시에는 챔버 전체의 누기율을, 표면방출률 평가 시에는 챔버 2층과 1층의 누기율을 각각 식 (2-11)에 적용하였다.

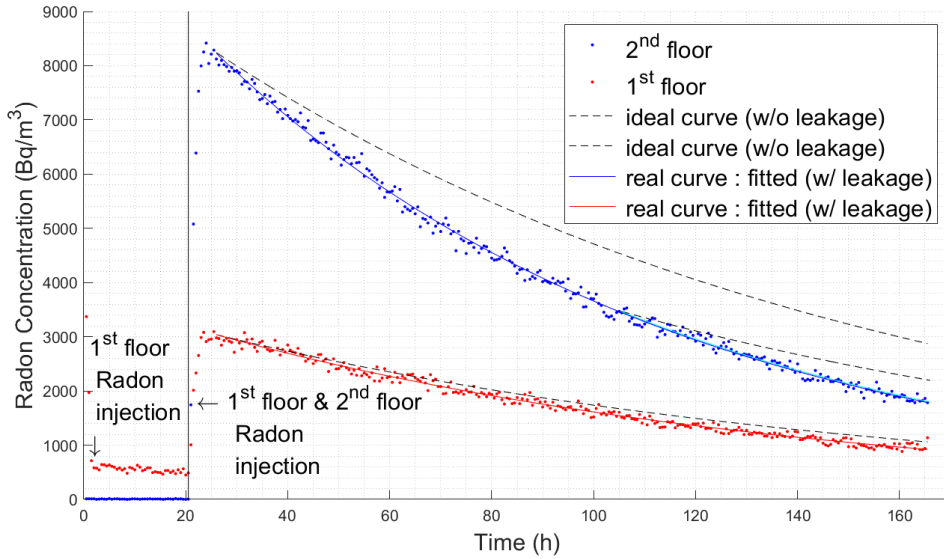


그림 22. 챔버 1,2층 누기율 평가 실험의 시간에 따른 라돈농도 그래프

표 2. 밀폐챔버의 누기율

밀폐챔버	누기율 λ_L $\times 10^{-3} [h^{-1}]$
챔버 전체	1.51
챔버 2층	3.40
챔버 1층	1.00

3. 측정값의 재현성, 반복성 확인

측정값이 의미를 갖기 위해서는 관찰을 위한 종속변인을 제외한 변인을 통제하여, 측정의 반복성과 재현성이 확보되어야 한다. 특히, 본 연구의 목적인 방출면적과 방출방식에 따른 라돈방출률 차이를 밝히기 위해서 측정값의 재현성 반복성 확인이 필수적이다. 본 실험에서는 시료의 수분함량을 주요하게 통제하였고, 추가적으로 챔버 내의 상대습도, 온도를 통제변인으로 하였다.

정확한 측정을 위해 라돈방출률은 장기측정이 요구된다. 라돈측정은 짧게는 하루에서 길게는 몇 달 간의 장기측정이 필요하다. 특히, 밀폐챔버 내에서 라돈농도가 평형농도로 수렴하기 위해서는 약 한달정도 시간이 소요된다. 장기 측정 시 계절에 따라 상대습도는 크게 바뀌기 때문에, 측정 및 시료 보관 시 상대습도는 시료의 수분함량에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 장기적인 측정을 위해 시료의 수분함량과 상대습도를 동시에 0에 가깝게 통제하였다. 수분함량을 통제하기 위해 시료를 베이킹하여 전처리하였고, 상대습도를 통제하기 위해 밀폐챔버 내부의 기체를 측정마다 질소로 퍼징하였다. 시료의 베이킹은 섭씨 105도에서 18시간동안 진행하였고, 이는 내부의 수분을 모두 증발시키고 시료의 손상이 발생하지 않도록 하기 위함이다. 이후 상대습도가 0인 또 다른 밀폐챔버를 이용하여 8시간동안 식힌 후, 측정용 밀폐챔버로 시료를 이동시켜 라돈방출률의 측정을 진행하였다. 질소 퍼징은 10 lpm으로 30분 이상 진행하여, 측정 전 챔버 내 초기 라돈농도와 상대습도를 0에 가깝게 통제하였다.

4. 라돈 방출면적에 따른 라돈방출률 평가

챔버 내부에 시료를 배치시키고, 내부기체를 질소기체로 퍼징한 후 30분 간격으로 챔버 내 라돈농도를 2대의 RAD7을 이용하여 측정하였다. 라돈의 부피방출률을 측정하기 위해 그림 13과 같이 시료의 모든 면으로부터 라돈이 챔버 내부로 방출되도록 시료를 배치하였다.

표면방출률을 측정시에는 그림 14와 같이 시료를 챔버 1층과 2층 사이의 경계창에 배치하여, 챔버 1층과 2층에서 각각 고무링의 크기에 해당하는 면적과, 시료의 전체면적에서 고무링의 크기에 해당하는 면적을 제외한 면적에서 방출되는 라돈을 측정하였다. 챔버의 1층과 2층의 경계창에 있는 방출면적이 4가지 크기(직경 85, 65, 45, 25 mm)를 가지도록 그림 9의 아크릴판을 교체해가며, 실험하여 방출면적에 따른 표면방출률 차이를 살펴보았다.

또한, 표면방출률 측정방법에서, 챔버 2층의 라돈농도에 의해 챔버 1층 표면방출률에 대한 영향요인을 억제하기 위해, 측정시간동안 챔버의 2층을 약 5 lpm으로 질소퍼징하여 챔버 2층의 라돈농도를 0에 가깝게 유지한 상태로 챔버 1층의 표면방출률을 평가하였다. 방출구멍의 직경이 65, 25 mm일 때, 챔버 2층 질소퍼징 시 챔버 1층으로 표면방출시 라돈방출률을 평가하였다.

제 3 장 결과 및 고찰

제 1 절 라돈 방출면적에 따른 라돈방출률 평가

방출방식과 방출면적을 변화하였을 때, 시간에 따른 챔버 내 라돈농도 그래프는 그림 23과 같다. 그래프에서 삼각형 표시와 역삼각형 표시는 각각 챔버 2층과 챔버 1층의 라돈농도를 나타낸다. 표면방출 방식으로 1층으로의 방출면적이 직경 25 mm 일 때, 측정된 라돈농도는 그래프의 가장 위쪽과 가장 아래쪽의 파란색 그래프에 해당한다. 표면방출 방식의 직경이 45, 65, 85 mm일 때, 그래프는 각각 분홍색, 연두색, 빨간색에 해당한다. 가장 안쪽에 하늘색에 해당하는 그래프는 부피방출 방식으로 측정된 시간에 따른 라돈농도이다. 표면방출 측정방식에서 시료의 라돈방출 면적이 1층보다 2층에서 크기 때문에, 2층의 라돈농도는 1층보다 크다. 또한, 1층으로의 방출면적이 작아질수록, 2층과 1층으로의 방출면적 차이가 커지기 때문에, 2층과 1층의 라돈농도 차이는 증가하였다. 부피방출 방식에서 2층과 1층의 라돈농도 차이는 오차범위 내에서 발생하였다.

챔버의 1층과 2층의 라돈농도 측정값을 부피에 대하여 가중하여 구한 평균값에 대한 그래프는 그림 24와 같다. 라돈농도에 대한 평균 C_{avg} 을 구할 때, 아래의 식을 사용하였다.

$C_{avg} = \frac{C_u V_u + C_d V_d}{V_C}$	(3-1)
---	-------

부피에 대해 가중평균한 평균라돈농도는 3% 이내에서 모두 일치하였다. 본 실험에서 사용된 챔버는 표면방출 방식에서 1층으로의 표면방출률을 측정함과 동시에 챔버 1,2층에서 가중평균된 라돈농도를 통해 부피방출률도 측정 가능하다. 이를 통해, 방출면적이 조절되는 측정조건에서도 측정의 반복성과 재현성에 대한 확인이 가능하다는 장점이 존재한다.

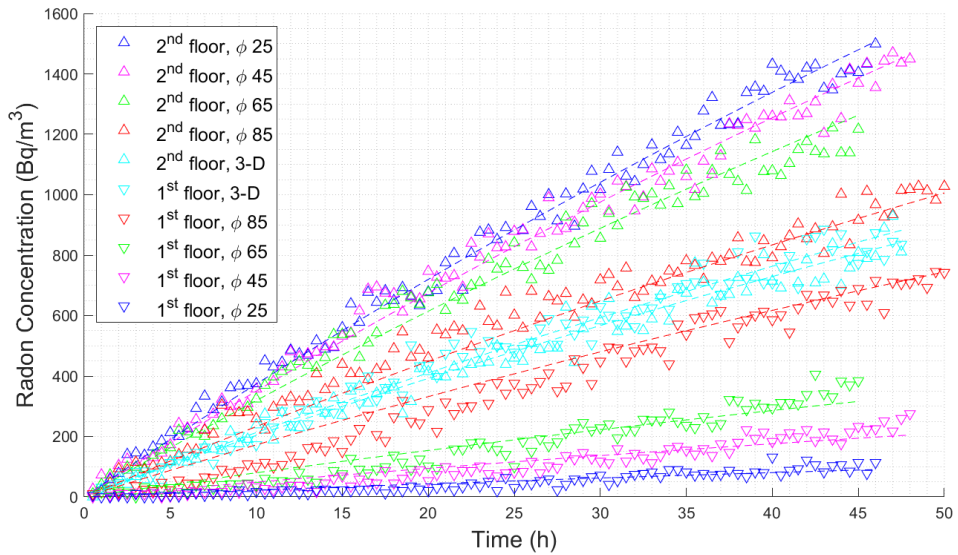


그림 23. 방출면적과 방출방식 변화하였을 때, 시간에 따른 챔버의 1층과 2층에서 측정된 라돈농도 그래프

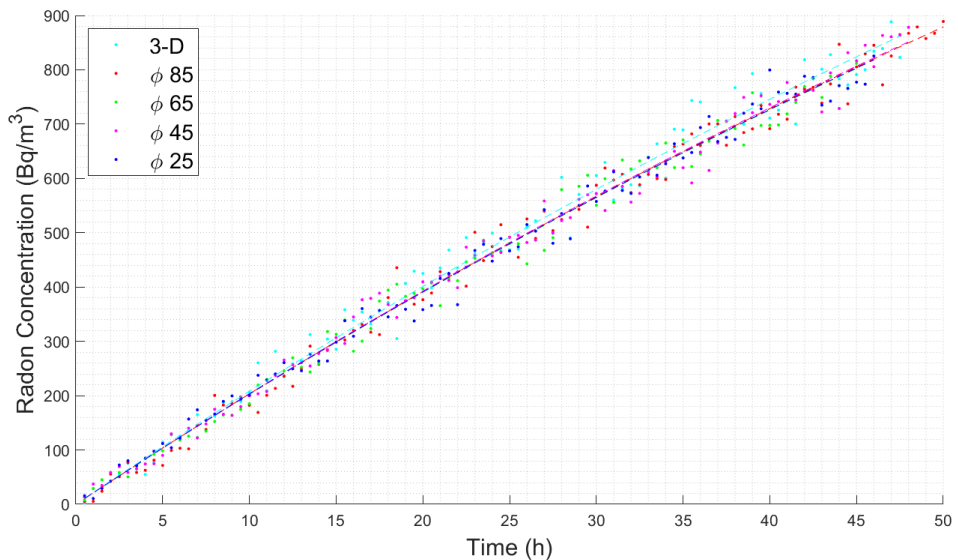


그림 24. 방출면적과 방출방식 변화하였을 때, 시간에 따른 챔버의 1층과 2층의 측정된 라돈농도를 부피에 대해 가중평균한 라돈농도 그래프

식 (2-11)을 그림 23에 적용하여 도출된 라돈방출률은 표 3의 두번째 행과 세번째 행과 같다. 여기서, 표 3의 네번째 행에 해당하는 평균 라돈방출률은 부피방출률에 해당하며 이를 기준값이라 정하였다. 평균 라돈방출률을 도출하기 위해서, 식 (2-11)을 그림 24에 적용하였다. 이때, 부피방출 방식에서 사용되었던, 챔버 전체의 유효부피와 챔버 전체의 누기율, 시료 전체의 면적을 식 (2-11)에 사용하였다.

표 3. 방출방식과 방출면적을 변화하였을 때, 챔버의 2층과 1층에서 라돈방출률과 가중평균된 라돈농도로부터 도출된 라돈방출률

E_0 [$Bq\ m^{-2}\ h^{-1}$]	부피방출	표면방출 [mm]			
		$\phi\ 85$	$\phi\ 65$	$\phi\ 45$	$\phi\ 25$
2층	13.4	8.6	11.3	12.1	12.7
1층	14.0	68.1	54.2	68.7	100.5
평균 (기준값)	13.7	13.4	13.3	13.4	13.4

라돈방출률은 단위면적당 단위시간당 라돈의 방출률 ($[Bq\ m^{-2}\ h^{-1}]$)에 해당하므로, 같은 시료에 대해서 방출면적에 상관없이 일정해야 한다. 하지만, 방출면적에 따라 라돈방출률은 일정하지 않고, 표면방출 방식으로 라돈방출률을 측정하면, 기준값 대비 최대 약 8배 차이가 발생한다. 라돈방출률의 차이를 발생시키는 원인을 다음 2가지 관점에서 살펴본다.

- 측정면 반대쪽의 라돈농도
- 방출면적 대비 시료의 확산 유효부피

① 측정면 반대쪽의 라돈농도

식 (2-38)에 따라 표면방출 측정방식에서 챔버 1층으로의 라돈방출률은 1층 챔버의 농도에 의해 감소하고, 2층 챔버의 농도에 의해 증가하다. 또한, 식 (2-39)에 따라 표면방출 측정방식에서 챔버 2층으로의 라돈방출률은 2층 챔버의 농도에 의해 감소하고, 1층 챔버의 농도에 의해 증가하다. 따라서 챔버 2층의 라돈농도가 방출면적의 차이로 1층에 비해 크기 때문에, 챔버 2층에서는 라돈방출률이 작게, 챔버 1층에서는 라돈방출률이 크게 측정된다.

하지만, 측정면 반대쪽인 1층에서의 라돈농도에 의한 챔버 2층으로의 라돈방출률 감소는 유의미하지 않을 것으로 예상된다. 챔버 1층의 라돈농도가 2층에 비해 작기 때문에, 1층의 라돈농도가 2층으로의 라돈방출률 증가에 거의 기여하지 못한다. 또한, 2층 자체의 라돈농도는 2층으로의 라돈방출률 감소에 거의 기여하지 못하는데, 후방확산의 효과는 챔버의 크기가 시료의 크기보다 충분히 클 때 무시할 수 있기 때문이다(C Samuelsson, 1990).

반면에, 챔버 1층으로의 라돈방출률은 1층, 2층 라돈농도 차이에 크게 증가할 수 있다. 마찬가지로, 후방확산의 효과는 챔버의 크기가 시료의 크기보다 충분히 클 때 무시할 수 있기 때문에, 1층의 라돈농도는 1층으로의 라돈방출률 감소에 크게 기여하지 못한다. 하지만, 챔버 2층의 라돈농도는 1층에 비해 크기 때문에, 1층으로의 라돈방출률 증가에 크게 기여할 수 있다.

결론적으로, 측정면 반대쪽의 라돈농도는 챔버 1층으로의 표면방출률을 증가시키는 요인으로 작용한다. 또한, 1층으로의 방출면적이 커질수록, 챔버 1층과 2층의 라돈농도 차이는 감소하므로, 라돈 표면방출률이 크게 측정되는 요인은 작아진다. 이는 시료 기준으로 두개의 공간으로 나뉠 경우 라돈방출률은 측정면 반대쪽 공간의 라돈농도에 영향을 받음을 나타낸다.

② 방출면적 대비 시료의 확산 유효부피

라돈의 시료내 확산거리는 라돈방출률에 영향을 준다. 앞서 살펴본 것과 같이 1차원에서 라돈의 시료내 확산거리에 비해 충분히 두껍지 못한 시료는 라돈방출률이 $\tanh\left(\frac{l}{L}\right) \leq 1$ 의 비만큼 작게 나타난다. 라돈은 시료에 따라 확산거리가 달라지며, 라돈의 공기중 확산거리는 약 2.2 m이고, 벽돌의 확산거리는 50 cm가 넘지 않는 것으로 알려져 있다(WW Nazaroff, 1988). 또한, 밀폐챔버로 방출되는 면적에 비해, 측정하는 대상의 확산 유효부피(effective volume)가 충분히 클 경우, 식 (2-16)의 1차원 가정은 성립한다. 하지만, 본 실험에 사용된 시료의 크기는 $20 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$ 로 방출면적에 따라 그림 25와 같이 확산에 기여할 수 있는 시료의 확산 유효부피의 크기는 달라진다.

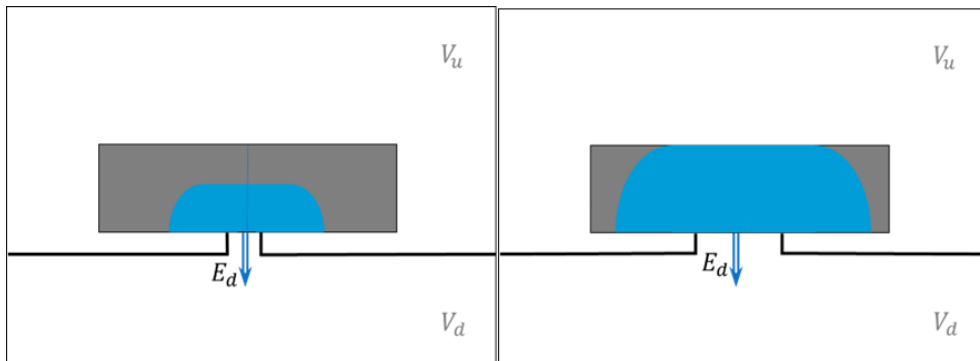


그림 25. 방출면적에 따라 시료내 확산 유효부피 모식도

3차원에서 시료의 방출면적에 따른 시료의 확산거리보다 시료의 크기가 충분히 크지 않을 때, 라돈방출률은 상대적으로 작게 평가된다. 마찬가지로, 방출면적이 작을수록, 방출면적 대비 확산 유효부피가 커지므로 챔버 1층으로의 표면방출률은 커진다. 1층으로의 방출면적이 작을수록, 표면방출률이 증가하는 영향은 더 커질 것이다.

반면에, 표면방출 방식에서 챔버 2층으로의 라돈방출률은 1층으로의 라돈방출에 의해 기준값 대비 감소한다. 1층으로의 방출면적이 커질수록, 라돈방출률이 감소하는 영향은 더 커질 것이다.

앞서 언급한 두가지 요인의 결과를 종합하면 표 4와 같다. 2가지 원인에 의해 표면방출 방식에서 기준값 대비 2층으로의 라돈방출률은 작게 측정되었으며, 1층에서의 표면방출률은 크게 측정되었다. 2층으로의 라돈방출률은 방출면적이 커질수록 감소폭은 커졌고, 1층으로의 표면방출률은 방출면적의 직경이 85, 65 mm 일 때를 제외하고, 방출면적이 작아질수록 증가폭은 커졌다. 예외가 발생한 원인으로 방출면적의 직경이 85 mm일 때 시료의 크기와 방출면적의 크기가 비슷해 챔버 1, 2층 농도차이에 의한 확산 효과가 커졌을 것으로 예상된다. 하지만, 이는 추가적인 실험으로 검증이 필요하다.

표 4. 표면 방출방식에서 방출률의 변화를 일으키는 원인과 영향

	측정면 반대쪽 라돈농도	방출면적 대비 시료 확산 유효부피
2층	라돈 방출률 감소 (영향 작음)	라돈 방출률 감소 방출면적 클수록 영향 증가
1층	라돈 방출률 증가 방출면적 작을수록 영향 증가	라돈 방출률 증가 방출면적 작을수록 영향 증가

제 2 절 확산 유효부피를 고려한 라돈방출률 차이

앞서 언급한 두가지 요인 중, 방출면적대비 시료의 확산 유효부피만 고려하기 위해, 측정 시 챔버의 2층을 질소퍼징하여 라돈농도를 0에 가깝게 유지하였다. 방출면적의 직경이 65, 25 mm 일 때, 라돈방출률을 측정한 결과는 각각 그림 26과 그림 27과 표 5와 같다. 챔버 2층의 라돈농도가 0이므로, 식 (2-38)에서 측정면 반대쪽의 라돈농도에 의해 1층으로의 표면방출률이 크게 측정되는 영향은 발생하지 않을 것이다. 하지만, 표면방출률은 기준값에 비해 표 5와 같이 여전히 크게 측정되었다. 이 현상은 방출면적의 직경이 25 mm일 때, 방출면적 대비 시료의 확산 유효부피가 더 크기 때문에 더욱 뚜렷하였다.

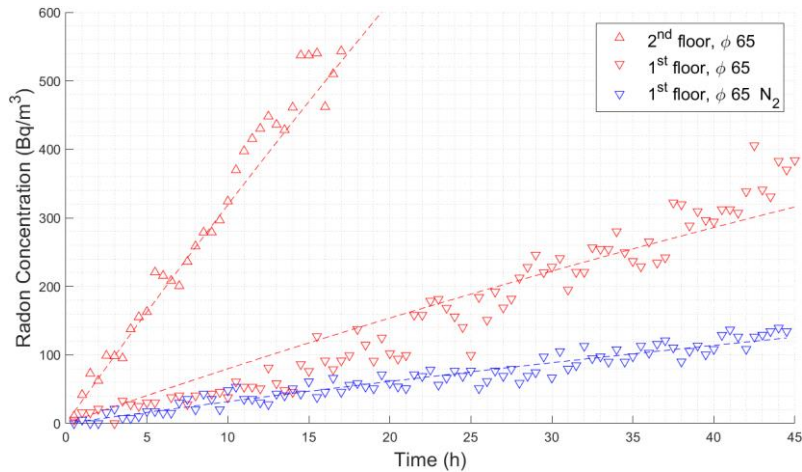


그림 26. 챔버의 2층을 질소퍼징하고, 1층에서 방출면적이 직경 65 mm일 때 시간에 따른 라돈농도 그래프

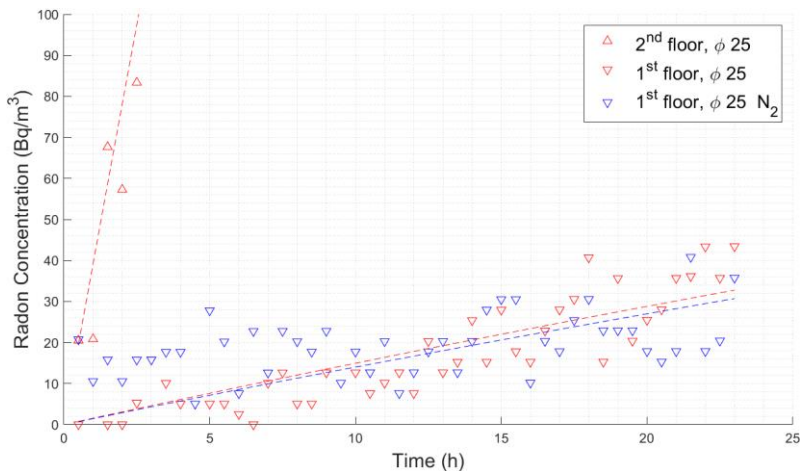


그림 27. 챔버의 2층을 질소퍼징하고, 1층에서 방출면적이 직경 25 mm일 때 시간에 따른 라돈농도 그래프

표 5. 챔버의 2층을 질소퍼징 전후, 챔버 1층으로의 표면방출률 결과

E_0 [$Bq\ m^{-2}\ h^{-1}$]	표면방출 [mm]			
	$\phi\ 65$		$\phi\ 25$	
	N ₂ :X	N ₂ :O	N ₂ :X	N ₂ :O
2층	11.3	-	12.7	-
1층	54.2	22.9	100.5	66.5
평균 (기준값)	13.3		13.4	

방출면적의 크기에 비해 시료의 크기가 충분히 커져, 시료의 확산 유효부피가 시료의 크기보다 작을 경우, 방출면적이 작아져도 표면방출률은 더 이상 증가하지 않고 어떤 값에 수렴할 것으로 예상된다. 이때 식 (2-16)에서 확산방정식의 1차원 가정이 성립할 것이다. 시료의 확산 유효부피보다 시료의 크기가 충분히 클 경우, 1차원으로 측정된 표면방출률을 기준값이라 생각할 수 있고, 유효부피보다 시료의 크기가 작을 경우, 표면방출률은 작게 측정되고 기하인자에 대한 보정이 필요하다. 따라서, 부피방출 방식의 라돈방출률 측정 시, 라돈의 시료내 확산거리와 시료의 크기를 포함한 기하인자를 고려하여 식 (2-11)로부터 도출된 라돈방출률 값의 보정이 필요하리라 생각된다.

제 4 장 결론 및 제언

제 1 절 결론

라돈의 자손핵종이 내부피폭의 원인에 해당하지만, 측정의 어려움으로 라돈을 측정하여 라돈에 대한 관리와 방사선방호를 시행한다. 라돈방호에 대한 예방조치로 실내 라돈농도와 직접적인 관련이 있는 라돈방출률의 측정은 필수적이다. 하지만, 표준측정법이 부재한 상황에서, 세계적으로 라돈방출률에 대한 연구는 활발히 진행되지만 측정방식의 차이가 존재한다. 따라서, 본 연구는 라돈방출률 측정의 반복성과 재현성을 확보한 상태에서, 라돈방출률이 부피방출률과 표면방출률 두가지 측정방식에 따른 라돈방출률의 차이를 밝히기 위해 방출면적을 조절하여 실험을 진행하였다. 본 연구에서 도출한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 라돈방출률 평가 시, 측정의 반복성과 재현성을 확보할 수 있었다. 측정전에 시료를 베이킹을 통해 전처리하여 시료의 수분함량을 0에 가깝게 통제하고, 챔버 질소 퍼징을 통하여 챔버 내 상대습도를 0에 가깝게 통제함으로써 변인 통제를 통한 측정의 반복성과 재현성을 확보하였다.
2. 시료의 방출되는 라돈의 표면방출률과 부피방출률을 동시에 평가하였다. 연구에 활용된 밀폐챔버는 표면방출 측정방식에서 1층으로의 표면방출률을 측정할 수 있으며, 표면방출 측정방식에서 측정된 라돈농도를 챔버 1,2층에서 가중평균하여 부피방출률을 동시에 측정 가능하다. 또한, 표면방출 측정방식에서 방출면적이 조절되는 측정조건에서도 부피방출률 평가를 통해 측정의 반복성과 재현성에 대한 확인이 가능하다는 장점이 존재한다. 측정방식과 방출면적이 다를 때, 부피방출률은 3% 내에서 결과값이 모두 일치하였다.
3. 라돈방출률은 부피방출과 표면방출 방식에서 같은 시료로 측정하여도 최대 8배의 큰 차이를 나타냈다. 원인으로서는 측정면 반대쪽 라돈농도의 영향과 기하인자인 방출면적 대비 시료 확산 유효부피의 차이로 확인되었다.

4. 측정면 반대쪽 라돈농도는 확산에 의해 챔버 1층으로의 표면방출률을 증가시켰고, 방출면적이 작을수록 영향은 더 커졌다. 또한, 2층으로의 라돈방출률을 감소시켰지만 영향은 상대적으로 크지 않다.
5. 기하인자인 방출면적 대비 시료 확산 유효부피의 차이는 챔버 1층으로의 표면방출률을 증가시켰고, 방출면적이 작을수록 영향은 더 커짐을 확인하였다. 또한, 챔버 2층으로의 라돈방출률을 감소시켰고, 방출면적이 클수록 영향은 증가하였다.
6. 챔버 2층을 측정 중 계속 질소퍼징하여, 챔버 2층의 라돈농도로 인한 챔버 1층으로의 표면방출률이 크게 측정되는 영향을 없앤 상태에서 챔버 1층으로의 표면방출률을 측정하였을 때, 1차원이 아닌 3차원 구조에서 방출면적 대비 시료 확산 유효부피의 차이에 의해 표면방출률은 기준값에 비해 여전히 크게 평가되었다.

제 2 절 제언

본 연구에서 부피방출 방식과 표면방출 방식에서 라돈방출률 측정값의 차이를 확인하고 원인을 밝혔다. 실내공간에서 활용된 모든 건축자재의 면적과 표면방출률의 곱으로, 실내 라돈농도를 도출할 수 있다(M Jang, 2016)는 점에서 표면방출방식의 표준측정법 정립 및 연구는 지속되어야 한다. 이에 대한 연구로 시료의 기하인자인 확산 유효부피에 영향을 주는 시료의 두께 및 부피 대비 표면적, 중형비를 고려한 표면방출률 평가가 진행되어야 한다. 또한, 표면방출률 측정 시, 측정면 쪽의 라돈농도가 후방확산에 의해 표면방출률을 감소시킬 수 있는 것처럼, 측정면 반대쪽의 라돈농도가 표면방출률을 증가한다는 사실을 고려해야 한다. 반면에, 부피방출 방식을 이용한 측정법은 충분한 시간이 흐르면 시료 공극 내의 거의 모든 라돈기체가 챔버 내로 방출되므로, 시료의 기하인자와 관계없이 라돈방출률이 아닌 라돈의 비방출률(specific exhalation rate) [$Bq \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$]이 일정한 값을 가질 것으로 예상된다. 또한, 방사능농도지수의 일부인 시료내 ^{226}Ra 의 함량과 비방출률이 상관관계가 있을 것으로 예상된다.

따라서, 추후연구에서는 기하인자를 고려한 표면방출률의 상관관계를 밝히기 위해 다양한 물질 및 구조를 갖는 시료로 연구의 진행이 필요하다. 이를 통해, 표준측정법 정립에 기여하고, 라돈방출률의 정확한 도출을 위해 시료의 확산거리 및 공극률, 기하인자를 고려한 수정된 라돈 mass transfer equation의 도입으로 정확한 라돈방출률의 평가를 통해 실내공간에서 라돈농도의 추정이 가능하리라 생각된다.

참고 문헌

- ABO-ELMAGD, M. 2014. Radon exhalation rates corrected for leakage and back diffusion—Evaluation of radon chambers and radon sources with application to ceramic tile. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 7.4: 390-398.
- CHAO, Christopher YH, et al. 1997. Determination of radon emanation and back diffusion characteristics of building materials in small chamber tests. *Building and Environment*, 32.4: 355-362.
- CHEN, Ching-Jiang; WENG, Pao-Shan; CHU, Tieh-Chi. 1993. Radon exhalation rate from various building materials. *Health Physics*, 64.6: 613-619.
- CHEN, Jing; RAHMAN, Naureen M.; ATIYA, Ibrahim Abu. 2010. Radon exhalation from building materials for decorative use. *Journal of environmental radioactivity*, 101.4: 317-322.
- COLLE, R_. 1981. Radon transport through and exhalation from building materials: a review and assessment.
- COZMUTA, I.; VAN DER GRAAF, E. R.; DE MEIJER, R. J. 2003. Moisture dependence of radon transport in concrete: measurements and modeling. *Health physics*, 85.4: 438-456.
- EC (EUROPEAN COMMISSION). 1999. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials. Radiation Protection 112, Directorate General Environment. *Directorate General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection*.
- EPA, 1999. Proposed Methodology for Assessing Risks from Indoor Radon Based on BEIR IV. Office of Radiation and Indoor Air, United States Environmental Protection Agency, Washington DC.
- GADGIL, A. J. 1992. Models of radon entry. *Radiation protection dosimetry*, 45.1-4: 373-379.
- HÄRTING, F. H.; HESSE, W. 1879. Der Lungenkrebs, die Bergkrankheit in den Schneeberger Gruben, *W. jSchr. Gerichtl. Med. Offentl. Sanitätsw*, 269-309.
- IAEA, 2013. Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues, Technical Reports Series No. 474, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna.

- IARC, 1988. Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans: Man-made Fibres and Radon. IARC Vol. 43. International Agency for Research on Cancer, Lyon.
- ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3). International Agency for Research on Cancer.
- ICRP, 1993. Protection Against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23 (2). International Agency for Research on Cancer.
- ICRP, 2010. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40(1). International Agency for Research on Cancer.
- ICRP, 2014. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126. Ann. ICRP 43(3). International Agency for Research on Cancer.
- ICRU, 2012. Measurement and Reporting of Radon exposures, Report No. 88, International Commission on Radiological Units and Measurements.
- ISO, 2007. Measurement of radioactivity in the environment — Soil — Part 3: Measurement of gamma-emitting radionuclides (ISO Standard No. 18589-3). International Organization for Standardization.
- ISO, 2012. Measurement of radioactivity in the environment — Air: radon-222 — Part 7: Accumulation method for estimating surface exhalation rate (ISO Standard No. 11665-7). International Organization for Standardization.
- JANG, Mee; KANG, Chang-Sun; MOON, Joo Hyun. 2005. Estimation of ²²²Rn release from the phosphogypsum board used in housing panels. *Journal of Environmental Radioactivity*, 80.2: 153-160.
- JANG, Mee, et al. 2016. Indoor external and internal exposure due to building materials containing NORM in Korea. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 307.3: 1661-1666.
- JONASSEN, NIELS; MCLAUGHLIN, J. P. Exhalation of radon-222 from building materials and walls. 1980.
- KINS, 2020, 대한민국 국민의 자연 및 인공 방사선 피폭량 조사, 한국원자력안전기술원(Korea Institute of Nuclear Safety).

- KELLER, G.; HOFFMANN, B.; FEIGENSPAN, T. H. 2001. Radon permeability and radon exhalation of building materials. *Science of the total environment*, 272.1-3: 85-89.
- KUMAR, Arvind, et al. 2015. Identifications and removal of diurnal and semidiurnal variations in radon time series data of Hsinhua monitoring station in SW Taiwan using singular spectrum analysis. *Natural Hazards*, 79.1: 317-330.
- LH, 2019, 쾌적한 실내공기질을 위한 건축자재 방사성물질 저감 가이드라인, 한국토지주택공사(Korea Land & Housing Corporation).
- LUDEWIG, P.; LORENSER, E. 1924. Untersuchung der Grubenluft in den Schneeberger Gruben auf den Gehalt an Radiumemanation. *Zeitschrift für Physik*, 22.1: 178-185.
- MARSH, James W., et al. 2008. Dosimetric models used in the Alpha-Risk project to quantify exposure of uranium miners to radon gas and its progeny. *Radiation protection dosimetry*, 130.1: 101-106.
- MORAWSKA, L.; PHILLIPS, C. R. 2021. Criteria for Closed Chamber Measurements of Radon Emanation Rate. In: *Indoor Air Pollution*. CRC Press. p. 201-215.
- NAZAROFF, William W.; NERO, Anthony V. 1988. Radon and its decay products in indoor air.
- NAZAROFF, William W. 1992. Radon transport from soil to air. *Reviews of geophysics*, 30.2: 137-160.
- PORSTENDORFER, J.; MERCER, T. T. 1979. Influence of electric charge and humidity upon the diffusion coefficient of radon decay products. *Health Physics*, 37.2: 191-199.
- PORSTENDÖRFER, J. 1994. Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air. *Journal of Aerosol Science*, 25.2: 219-263.
- ROGERS, V. C.; NIELSON, K. K. 1991. Multiphase radon generation and transport in porous materials. *Health Physics*, 60.6: 807-815.
- SAMUELSSON, Christer. 1990. The closed-can exhalation method for measuring radon. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 95.2: 167.

- UNSCEAR, 1982. Ionizing Radiation, Sources and Biological Effects. 1982 Report: Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations, New York.
- UNSCEAR, 1993. Sources and Effects of Ionizing Radiation. 1993 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations, New York.
- UNSCEAR, 2000. UNSCEAR 2000 Report: Annex B. Exposure from Natural Radiation Sources. United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- UNSCEAR, 2019. UNSCEAR 2019 Report: Annex B. Lung Cancer from Exposure to Radon. United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- WHO, 1986. Indoor Air Quality Research: Report on a WHO Meeting, Stockholm, 27–31 August 1984. World Health Organization, Copenhagen.
- WHO, 2009. WHO Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective. World Health Organization, Geneva.
- WHO, 2010. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. World Health Organization. Regional Office for Europe.
- WHO, 2022. Compendium of WHO and other UN guidance on health and environment, 2022 update. World Health Organization.
- YARMOSHENKO, Iliia V., et al. 2020. Radon concentration in conventional and new energy efficient multi-storey apartment houses: Results of survey in four Russian cities. Scientific reports, 10.1: 1-14.
- 환경부, 2010. 실내공기질공정시험기준. 실내 공기 중 라돈 측정방법. 55-66.
- 환경부, 국토교통부, 원자력위원회, 2019. 건축자재 라돈 저감·관리 지침서.

Abstract

Jin-Goo Kang

Department of Nuclear Engineering

The Graduate School

Seoul National University

This research experimentally confirmed that the radon exhalation rate, which was measured by volume release method and surface release method, was different for the same specimen while ensuring the repeatability and reproducibility of radon exhalation rate. The exhalation rate derived through surface exhalation measurement shows different result depending on the measured exhalation area and is larger than the exhalation rate derived through volume exhalation measurement. However, in the existing radon exhalation rate study, geometric factors of building materials such as thickness and surface area compared to volume are not considered, and geometric factors corresponding to diffusion effective volume were not considered based on the assumption of radon exhalation in one dimension. This study experimentally revealed that if the diffusion effective volume is large compared to the size of the sample, the radon release rate could be measured smaller than if the size of the sample is sufficiently large. In addition, as the exhalation area became smaller, the diffusion effective volume compared to the exhalation area increased, and thus the surface exhalation rate was evaluated bigger. Finally, it was experimentally confirmed that the radon exhalation rate can be greatly evaluated by the radon concentration

on the opposite side of the measurement plane, just as the radon concentration on the measurement plane contributes to the reduction in the radon exhalation rate due to the back diffusion.

Keywords : Surface Exhalation Rate

Volume Exhalation Rate

Exhalation area

Closed Chamber Method

Repeatability and Reproducibility of Measurements

Diffusion Effective Volume

Student Number : 2020–28890