

실내 공기 중 라돈 측정방법 -

2024

알파비적검출법

(determination of indoor radon by alpha track detector)

1.0 개요

1.1 목적

1.1.1 이 시험기준은 실내 공기 중의 라돈-222(Rn-222, 이하 라돈) 농도의 장기 측정 방법을 규정한다.

1.1.2 검출소자(CR-39 또는 LR-115)를 내장한 검출기를 실내 공기 중에 일정 기간 노출시켜 검출소자의 표면에 생성된 미세한 손상(이하 비적)을 계수하는 방법이다. 검출기 내로 유입된 라돈 및 라돈붕괴생성물로부터 방출된 알파입자가 검출소자의 표면에 입사하여 생성시킨 비적을 화학적 처리를 통하여 확장시킨 후 현미경으로 단위면적당 비적의 수(비적 밀도)를 계수하여 공기 중 라돈의 평균 농도(이하 라돈 농도)를 결정한다.

1.2 적용범위

이 시험기준은 장기간 라돈 평균 농도를 평가할 때 적합하며, 90 일 이상 1 년 미만의 측정시간이 요구된다.

1.3 간섭 물질

1.3.1 이 시험방법의 측정 결과의 영향 변수는 검출기 보관 및 운송, 측정 환경, 전처리와 비적 계수 과정 등 측정·분석 단계 각 과정에 존재한다. 일반적으로 아래의 변수들이 측정 결과에 영향을 미칠 수 있다.

- 온도, 바탕방사선, 검출기 바탕농도, 습도, 시료채취 과정에서의 급격한 기류의 변화

- 검출기 또는 검출소자 보관 상태, 시료채취 후 보관, 라돈붕괴생성물의 농도
- 검출기 내부의 알파입자 방출 물질, 현장 측정 중 열 및 전자기장, 기타

1.3.2 간섭물질의 영향을 최소화하기 위해서는 검출기 제조사가 제시한 사용법을 준수하여야 한다.

2.0 용어정의

2.1 라돈-222(Rn-222)

2.1.1 라듐-226(Ra-226)이 방사성 붕괴할 때 생성되는 불활성 원소로서 3.823 일의 반감기를 갖는 무색, 무취의 방사성 기체다.

2.1.2 흙이나 암석 등 자연계에서 생성되는 천연 라돈은 3개의 동위원소(Rn-222, 220, 219)가 있으며 천연 방사능 붕괴계열이 함유된 우라늄-238(U-238), 토륨-232(Th-232), 우라늄-235(U-235) 방사성 붕괴 계열에서 각각 생긴 것들이다.

2.1.3 이 시험기준에서 라돈은 우라늄-238 (U-238)이 연속 붕괴하며 생성된 라돈-222 (Rn-222)를 의미한다.

2.2 라돈붕괴생성물(radon decay product)

라돈붕괴생성물은 라돈이 붕괴되면서 차례로 생성되는 방사성 생성물로 폴로늄-218(Po-218), 비스무스-214(Bi-214), 폴로늄-214(Po-214), 납-210(Pb-210) 등이 있으며, 붕괴 시 알파, 베타 또는 감마선을 방출한다.

2.3 방사능(activity)

주어진 물질 내에서 단위시간 동안 일어나는 원자핵 붕괴의 수. 방사능은 대상 원소의 원자 수와 아래의 식으로 관계되어 있다.

$$A = \lambda N = \frac{\ln 2}{T} N \quad (\text{식 1})$$

여기서, A : 방사능 (Bq)

λ : 붕괴상수 (s^{-1}), $\lambda = \ln 2/T \approx 0.693/T$

N : 관련 원소의 원자 수

T : 관련 방사성 원소의 반감기 (s)

2.4 방사능 농도(activity concentration)

단위 부피에 포함된 해당 원소의 방사능으로 Bq/m³의 단위를 사용한다.

2.5 베크렐(Bq, becquerel)

방사성 원자핵이 방사선을 방출하며 붕괴하는 비율을 나타내는 단위로 1 초 동안에 물질 중 하나의 방사성 핵종이 붕괴되어 다른 핵종으로 바뀔 때 1 Bq이라고 한다.

※ 퀴리(Ci) : 과거에 사용하던 방사능 단위, 1 pCi/L = 37 Bq/m³

2.6 알파 입자(alpha particle)

2.6.1 우라늄이나 라듐과 같은 방사성 물질이 알파 붕괴하는 과정에서 방출된다. 원자핵은 알파붕괴 과정에서 양성자 2 개와 중성자 2 개를 방출하고 다른 원자핵으로 변하는데, 이때 방출된 입자가 알파입자이다.

2.6.2 알파입자는 전하와 무거운 질량으로 인해 쉽게 물질에 흡수되어, 공기 중 이동 거리는 짧으나, 체내에 유입되면 강하게 이온화되어 다른 방사선에 비해 피해가 클 수 있다.

2.7 에칭(etching)

NaOH나 KOH과 같은 용액에 담가 방사선으로 손상된 부분을 부식시키는 방법이다. 에칭을 함으로써 현미경 등으로 방사선으로 손상된 부분을 확인할 수 있다.

3.0 분석기기 및 기구

3.1 알파비적 검출기(alpha track detectors)

3.1.1 알파비적검출기는 내부에 장착된 검출소자까지 확산된 라돈 또는 라돈 자손핵종의 농도를 장기간 측정하기 위해 현장에 설치하는 검출기로 검출소자는 측정 중 라돈 이외 환경적 요인에 의한 영향을 최소화하기 위해 적절한 구조의 용기 내부에 위치한다.

3.1.2 검출기에 주로 사용되는 검출소자는 LR-115와 CR-39가 있다.

3.2 에칭기

3.2.1 에칭은 NaOH나 KOH과 같은 용액을 사용하나, 에칭액의 종류 및 농도, 온도와 같은 조건에 따라 에칭 비율이 크게 달라지므로 검출기별로 에칭 비율이 최대가 되는 에칭 조건으로 적용해야 한다.

3.2.2 일반적으로 사용되는 에칭기는 에칭 과정 동안 온도와 접촉시간이 일정하게 유지될 수 있도록 교반기가 장착된 수욕조 형태의 장치이다.

3.3 비적 계수기

3.3.1 에칭이 완료된 검출 소자의 표면에 생성된 비적의 단위 면적당 수를 세는 장비로 비적 계수 방법에 따라 수동 계수와 자동 계수기로 나눌 수 있다.

3.3.2 수동 계수는 시험자가 직접 적절한 배율을 갖는 현미경을 이용, 검출소자 표면에 생성된 비적의 수를 직접 계수하며, 자동 계수기는 기기에 부착된 현미경과 카메라를 이용하여 검출소자 표면에 생성된 비적을 확대하고, 컴퓨터 영상을 이용하여 비적의 수를 자동 계수한다.

3.3.3 검출소자에 생성된 비적 수와 계수 면적은 자동 또는 수동으로 기록되어야 한다.

3.4 내부 정도관리용 라돈 챔버 시스템(radon chamber system)

라돈 챔버 시스템은 일반적으로 라돈연속측정기 및 알파비적 검출기 등의 정도관리에 사용되며, 내부에 일정 부피를 갖는 기밀성이 유지되는 용기인 라돈 챔버와 라돈 선원(radon source), 용기 내 공간에 방출된 라돈 농도를 측정하는 기준 장비로 구성된다.

3.4.1 라돈 챔버

3.4.1.1 라돈 챔버 제작에 사용되는 재질은 부식되지 않는 매끄러운 물질을 사용하며, 사용하는 동안 내부 환경의 교란 발생을 최소화할 수 있는 구조를 갖추어야 한다.

3.4.1.2 라돈 챔버 내 기류를 배기하지 않는 정적 운전 방식과 배기하는 동적 운전 방식으로 구분하며, 동적 운전 방식은 폐쇄회로(대기의 재순환)와 개방회로(일부 또는 전체 배기)의 운전 방식이 있다.

3.4.2 라돈 선원

3.4.2.1 라돈 챔버 시스템에는 일반적으로 라듐(Rn-226) 염으로 만들어진 고체 선원과 라듐(Rn-226) 염을 산성용액에 용해 시킨 액체 선원이 라돈 선원으로 사용된다.

3.4.2.2 선원의 방사능 농도는 라돈챔버의 크기와 챔버 내 라돈-222 총 노출량, 라돈-222 농도 등을 고려하여 선정하여야 한다. 라돈 선원은 유리 또는 스테인리스 스틸 등의 용기에 밀봉하여 보관하여야 한다.

3.4.3 기준 장비

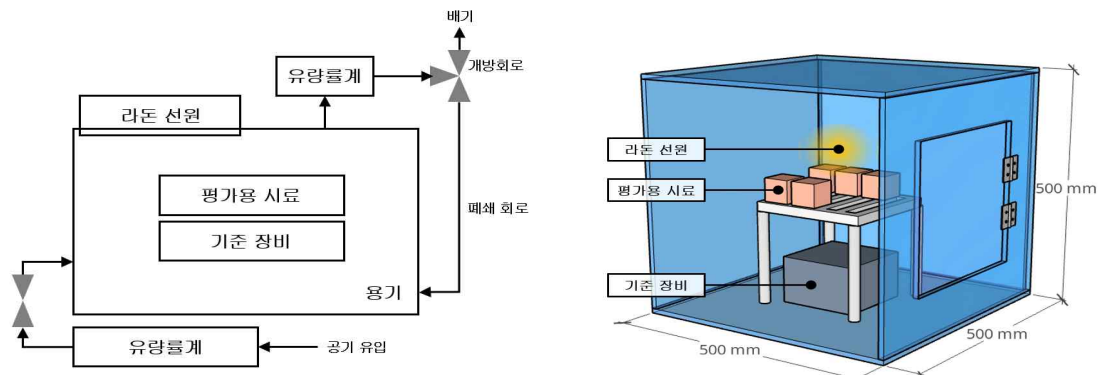
3.4.3.1 라돈챔버의 라돈농도 측정을 위한 기준 장비는 주기적으로 교정 및 정도검사를 받은 연속라돈측정기를 사용하여야 한다.

3.4.3.2 기준장비를 사용하여 챔버 내 방출된 라돈은 1 시간 단위로 평균 농도를 측정하고, 아래의 식과 같이 측정기간 동안의 1 시간 평균 농도를 합산하여 총 노출량을 산출한다.

$$\text{총 노출량(Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}) = \sum_{i=1}^t C_{Rn,i} \quad (\text{식 } 2)$$

여기서, C_{Rn} : 측정 후 i 시간에서의 한시간 라돈 평균 방사능 농도 ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)

t : 측정시간 (h)



(1) 라돈챔버시스템 구성도 예시

(2) 밀폐식 라돈챔버시스템 개요도 예시

그림 1. 내부 정도관리용 라돈챔버시스템의 예시

4.0 시약 및 표준 용액

4.1 에칭 용액

화학적 에칭에는 NaOH나 KOH 수용액이 사용되며 각 검출소자의 특징과 작업 효율 등을 고려한 표 1의 조건에서 에칭이 이루어진다.

표 1. 에칭 조건의 예

검출소자	부식용액	에칭 온도	에칭 시간	참고문헌
CR-39	6.25 N NaOH	70 °C	8 h	R.shweikani et. al.
	20 % NaOH	90 °C	2 h	Statens stralevern
	10 % NaOH	60 °C	1 h	S.Y.Y. Leung et. al.
LR-115	2.5 N NaOH	60 °C	1 h	K.P. Eappen. et. al.
	10 % NaOH	60 °C	1.5 h	전채식 외 1인

5.0 시료 채취 및 관리

5.1 시료 채취 지점

5.1.1 급격한 환경 변화가 없을 것으로 판단되는 지점 및 측정 기간 중 이동, 건물을 철거하는 등의 지속적인 측정이 불가능한 사유가 발생하지 않는 지점을 선정하여야 한다.

5.1.2 측정지점은 발열 및 정전기 발생이 우려되는 지점 및 실외 공기와 직접 만나는 곳(창문 또는 냉·난방기 근처), 물기가 많은 곳(욕실, 주방)은 피해서 선정한다.

5.2 시료 채취 및 관리

5.2.1 알파비적검출기를 사용한 실내라돈 농도 측정은 90 일 이상 소요되며, 시료 채취는 검출기를 포장지에서 개봉하면서부터 시작된다. 이때 반드시 검출기의 일련번호와 설치 날짜 및 시간을 기록한다.

5.2.2 시료채취가 종료되면 기밀이 가능한 포장지로 포장·보관하여 실험실까지 운반하여 분석한다.

6.0 정도보증/정도관리(QA/QC)

6.1 검출기 관리

6.1.1 검출기 교정효율 산출

6.1.1.1 실내 라돈 측정에 사용되는 알파비적검출기는 알파입자에 의해 생성된 비적을 노출된 라돈 농도로 환산할 수 있는 환산계수(C_F 또는 교정효율)를 가지고 있어야 한다.

6.1.1.2 시설 내의 환경조건(온도, 습도, 라돈농도, 공기흐름 등)은 교정효율에 영향을 줄 수 있어 라돈검출기 교정시설은 온도 및 습도 등 환경조건이 안정되게 유지 할 수 있는 능력을 갖추고 있어야 한다.

6.1.1.3 환산계수(C_F 또는 교정효율)와 환산계수의 불확도는 공인교정기관을 통하여 교정을 수행하거나, 일차 측정표준과 소급성이 유지된 측정값이어야 한다. 라돈 노출량과 생성된 비적의 수로 아래의 식에 의해 구할 수 있다.

$$C_F = \frac{G - B}{E_X} \quad (\text{식 3})$$

여기서, C_F : 알파비적검출기 교정효율 ($\text{tracks} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^3$)

G : 교정용 검출소자의 단위 면적당 비적 수 ($\text{tracks} \cdot \text{cm}^{-2}$)

B : 바탕농도 검출기의 단위 면적당 비적 수 ($\text{tracks} \cdot \text{cm}^{-2}$)

Ex : 라돈 노출량 ($\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$)

6.1.1.4 일반적으로 환산계수(C_F 또는 교정효율)는 제조사가 검출기별로 제시한 값을 적용할 수 있다.

6.1.2 교정효율 불확도 산출

알파비적검출기 교정효율의 불확도는 아래의 식으로 주어진다.

$$u(C_F) = \frac{1}{Ex} \sqrt{G + B + [C_F u(Ex)]^2} \quad (\text{식 4})$$

여기서, $u(C_F)$: 알파비적검출기 교정효율의 표준불확도 ($\text{tracks} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^3$)

$u(Ex)$: 라돈 노출량의 표준불확도 ($\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$)

6.1.3 검출기 품질관리

6.1.3.1 의도하지 않은 라돈 및 라돈 자손에 노출되어 검출기 표면에 비적이 생성될 수 있다. 따라서 이를 최소화하기 위해 검출 소자는 사용 전까지 질소가 주입되어 외부 공기가 들어오지 못하는 용기나 질소가 주입된 기밀용기에 보관하여야 한다.

6.1.3.2 운송기간 중 라돈에 노출될 우려가 있으므로 검출기를 밀봉하여야 한다. 라돈은 얇은 폴리에틸렌과 PVC와 같은 포장지를 쉽게 침투할 수 있으므로 알루미늄 코팅된 포장지 등 정전기 발생을 방지할 수 있는 포장지를 사용하는 것이 바람직하다.

6.2 바탕농도 관리

6.2.1 방법바탕농도(method blank concentration)

6.2.1.1 방법바탕농도는 라돈검출기 자체 또는 전처리 및 판독과정에서 발생하는 잡음에 의해 발생한다.

6.2.1.2 방법바탕농도를 측정하여 주기적으로 실시하는 교정 시 검출기 배치의 사용 여부 결정 및 교정효율 산출에 이용하여야 한다. 측정된 바탕농도의 평균 준위가 15 Bq/m^3 이상이거나 바탕농도의 표준편차가 5 Bq/m^3 이상이면 사용을 중지한다.

6.2.2 현장바탕농도(field blank concentration)

측정기간 동안 온도 등 환경변화에 따라 검출기에 의도치 않은 영향을 미칠 수 있어 측정지점의 최소 5 % 이상의 지점에 현장바탕농도 측정용 검출기를 설치하여야 한다. 바탕 농도 측정용 검출기의 결과값은 검출한계 미만으로 관리되어야 한다.

6.3 내부 정도관리

6.3.1 내부 정도관리용 시료

6.3.1.1 내부 정도관리용 라돈 챔버시스템의 라돈 선원을 개방하여 라돈 챔버 내로 라돈이 방출되도록 한 후 공기 중 라돈 농도를 **3.4.3**의 기준 장비로 측정하여 총 노출량이 $400 \text{ kBq} \cdot \text{h/m}^3$ 이상 노출될 수 있는 시간을 산정한다.

6.3.1.2 챔버 내 공기 중 라돈 농도가 배경농도(약 15 Bq/m^3) 수준으로 떨어질 때까지 충분히 시간을 방치한다.

6.3.1.3 챔버 내 라돈 농도가 배경농도 수준까지 떨어진 후 검출기를 5개 이상 동시에 라돈 챔버에 위치시키고 라돈 선원을 개방한 후 검출기 표면에 일정한 수준 이상의 비적 이 생성될 수 있도록 **6.3.1.1**에서 산정한 시간 이상 노출시킨다.

6.3.1.4 챔버 내의 검출기가 라돈에 노출된 순간부터 기준 장비로 라돈농도를 측정하여 노출기간 동안의 검출기의 총 노출량을 산정하고 내부 정도관리용 시료로 사용한다.

6.3.1.5 노출이 완료된 검출기는 사용 전까지 외부 공기가 유입되지 않도록 **6.1.3.2**에 따라 관리하여야 한다.

6.3.1.6 내부 정도관리용 시료는 내부 정도관리용 라돈 챔버시스템을 사용하여 직접 제작하거나, 외부에서 동일한 방법을 사용하여 제작된 것을 사용할 수 있다.

6.3.2 정확도 관리

6.3.2.1 정확도 관리는 챔버 내 설치된 라돈측정 기준장비로 측정된 총 라돈 노출량과 알파비적 검출기에서 측정된 라돈 노출량의 편차로 구하며, 12 개월에 1 회 이상 실시해야 한다.

6.3.2.2 검출기마다 생성된 비적의 수를 환산계수를 이용하여, 각각의 검출기의 총 라돈 노출량을 구하고, 기준 장비에서 측정된 총 노출량과의 상대 백분율 오차를 산출한다.

6.3.2.3 정확도는 5개 이상 개별 검출기의 상대 백분율 오차에 대한 절대값의 평균값으로 평가한다. 분석 정확도의 범위는 25 % 내에 있어야 한다.

6.3.3 정밀도 관리

정밀도는 시험분석 결과의 반복성을 나타내는 것으로 반복 시험하여 얻은 결과를 상대 표준편차 (RSD)로 나타내며, 12 개월에 1 회 이상 실시해야 한다. 챔버에서 동시에 노출된 검출기 측정 결과의 평균값 ($\bar{x}$)과 표준편차 (s)로 구하며, 아래의 식과 같이 계산한 정밀도가 10 % 이내에서 관리되어야 한다.

$$\text{정밀도(\%)} = [\text{표준편차}/\text{평균값}] \times 100 \quad (\text{식 } 5)$$

7.0 분석 절차

7.1 전처리

7.1.1 에칭(etching)

7.1.1.1 에칭은 검출소자의 표면에 생성된 비적을 현미경으로 계수할 수 있도록 화학적으로 처리하는 과정이다.

7.1.1.2 화학적 에칭에는 NaOH나 KOH 수용액이 사용되며 각 검출소자의 특징과 작업 효율 등을 고려한 적절한 조건에서 에칭이 이루어진다. 일반적으로 에칭 방법은 검출기 제조사가 제시한 사용법을 준수하여야 한다.

8.0 결과 보고

8.1 라돈 농도 산출

알파비적 검출기를 이용하여 채취된 라돈의 농도는 내부의 검출소자를 꺼낸 다음 화학적 에칭 과정을 거쳐 검출소자의 비적 수를 계수하고 단위면적당 비적 수를 산출한다. 이 때 바탕농도 검출기도 동일한 과정을 거쳐 비적 수를 얻는다.

$$C_{Rn} = \frac{(G - B)}{\Delta t C_F} \quad (\text{식 6})$$

여기서, C_{Rn} : 라돈 평균방사능농도 ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)

G : 측정한 검출기의 단위 면적당 비적 수 ($\text{tracks} \cdot \text{cm}^{-2}$)

B : 바탕농도 검출기의 단위 면적당 비적 수 ($\text{tracks} \cdot \text{cm}^{-2}$)

Δt : 노출시간 (h)

C_F : 교정효율 ($\text{tracks} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^3$)

8.2 시험결과의 정리

라돈 검출기를 이용하여 라돈 농도를 측정하였을 경우 결과보고에는 다음과 같은 내용이 기록되어야 한다.

8.2.1 기기 사양

라돈검출기의 제조회사나 모델명, 제작일, 고유번호 등이 있어야 한다.

8.2.2 측정조건

측정 일자, 측정(노출) 시간, 측정 장소인 건물의 형태 및 특성과 측정 지점이 도면상에 표시되어야 하며 제반 환경(온도, 습도, 밀폐 여부, 환기 장치, 가습기 가동 여부, 흡연 등)이 포함되어야 한다.

8.2.3 측정 결과

라돈 농도 표기 시 소수점 첫째 자리까지 표기한다.

9.0 참고자료

9.1 ISO 11665-1:2019, Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 -- Part 1: Origins of radon and its short-lived decay products and associated measurement methods

9.2 ISO 11665-4:2021, Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 -- Part 4: Integrated measurement method for determining average activity concentration using passive sampling and delayed analysis

9.3 IEC 61577-1 ed2.0 (2006-07), Radiation protection instrumentation – Radon and radon decay product measuring instruments – Part 1: General principles.

9.4 IEC 61577-2 ed2.0 (2014-07), Radiation protection instrumentation – Radon and radon decay product measuring instruments – Part 2: Specific requirements for ²²²Rn and ²²⁰Rn measuring instruments

9.5 IEC 61577-4 ed2.0 (2009-02), Radiation protection instrumentation – Radon and radon decay product measuring instruments – Part 4: Equipment for the production of reference atmospheres containing radon isotopes and their decay products (STAR)

10.0 “내용 없음”