

실내 공기 중 라돈 측정방법 -

2017

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 실내 공기 중 라돈 및 라돈붕괴생성물이 방출하는 알파입자가 고체형태의 검출소자(필름)에 입사될 때 생성된 손상을 충분한 기간 동안 축적한 후 화학적 처리를 통하여 손상의 흔적을 계수하여 공기 중 라돈의 평균방사능농도(이하 평균농도)를 측정하는 방법이다.

1.2 적용범위

1.2.1 이 시험기준은 실내 공기 중 라돈 농도 측정을 위한 주시험방법으로 사용된다.

1.2.2 본 방법을 이용한 내 실내 공기 중 라돈 농도 측정은 장기 측정으로 90일 이상 1년 미만의 측정시간을 필요로 한다.

1.2.3 이 시험기준은 연평균 라돈 농도를 평가할 때 단기 측정방법보다 적절하다.

1.3 간섭 물질

본 방법을 이용한 측정결과에 영향을 미치는 변수는 검출소자의 보관, 검출기의 운송, 시료채취, 검출소자의 처리 및 분석의 각 과정에 존재한다. 무엇보다도 검출기 제조사

가 제시한 사용법을 따르도록 한다. 일반적으로 아래의 측정결과에 영향을 미칠 수 있는 아래의 변수를 고려한다.

- 온도
- 바탕방사선
- 검출기 바탕농도
- 습도
- 시료채취 중 급격한 대류의 변화
- 검출기 또는 검출소자 보관 상태
- 시료채취 후 보관
- 라돈붕괴생성물의 농도
- 검출기 내부의 알파입자 방출 물질
- 시료채취 중 열 및 전자기장
- 기타

2.0 용어정의

2.1 라돈-222(Rn-222)

라듐-226(Ra-226)이 방사성 붕괴할 때 생성되는 불활성 원소로서 3.823 일의 반감기를 갖는 무색, 무취의 방사성 기체다. 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. 이 시험기준은 라돈은 U-238이 연속 붕괴하며 생성된 Rn-222에 대한 것이다.

2.2 라돈붕괴생성물(radon decay product)

라돈이 붕괴되면서 차례로 생성되는 생성물을 말한다. 라돈붕괴생성물은 폴로늄-218(Po-218), 비스무스-214(Bi-214), 폴로늄-214(Po-214), 납-210(Pb-210)로 방사성을 띄며 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)

원자핵 방사선의 일종으로 두 개의 중성자와 두개의 양성자가 결합된 He-4의 원자핵과 같으며 무거운 방사성 원소가 붕괴할 때 방출한다.

2.7 알파비적검출기(alpha track detectors)

플라스틱 필름, 셀룰로스 필름 등과 같은 검출소자에 라돈 및 라돈붕괴생성물이 붕괴할 때 방출되는 알파입자가 입사될 때 필름의 조직에 미세한 손상으로 생성되는 흔적을 검출하여 라돈 농도 등을 측정하는데 사용된다. 검출소자로 이용되는 필름으로는 LR-115와 CR-39가 있다. 알파비적검출기(이하 라돈검출기 또는 검출기)는 측정에 방해가 되는 외적 요인을 제거하기 위해 적절한 용기 내에 장착하여 사용한다. 흔히 SSNTD(solid-state nuclear track detector)로 약칭하기도 한다.

2.8 에칭(etching)

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

2.9 라돈 챔버(radon chamber)

특정 라돈 농도, 온습도, 부유입자, 대류 등의 조건으로 설정이 가능하며, 필요에 따라 기밀이 유지되는 일정 공간을 이룬다. 라돈챔버는 라돈 연속측정기 및 수동검출기의 교정 등에 사용된다.

3.0 분석기기 및 기구

3.1 알파비적검출기

알파비적검출기의 검출원리는 검출소자인 LR-115 또는 CR-39과 같은 고체 물질 표면에 라돈 및 라돈붕괴생성물로부터 알파입자가 입사될 때 재료의 조직에 생성되는 미세한 손상을 화학적 처리를 통하여 확대한 후 현미경으로 흔적의 개수를 세어 공기 중 라돈의 농도를 측정하는 것이다. 검출기는 검출소자가 측정 중 라돈 이외 환경적 요인에 의한 영향을 최소화하기 위해 적절한 구조의 용기에 넣어 사용한다.

3.2 에칭기

화학적 에칭에는 NaOH나 KOH 수용액이 사용되며 시험에 사용된 검출소자의 특성 등을 고려하여 최적의 조건(용액의 농도 및 온도, 에칭 시간)이 확보되어야 한다.

3.3 비적 계수기

에칭이 완료된 검출소자의 표면에 형성된 비적의 단위 면적당 수를 세는 장치로 수동 방식의 경우는 적절한 배율을 갖는 현미경을 이용하여 확대된 검출소자의 주어진 표면적

에 분포하는 비적의 수를 직접 센다. 자동 방식은 현미경을 이용하여 확대된 검출소자의 주어진 표면적의 영상을 얻고 이를 컴퓨터를 이용하여 검출소자의 주어진 표면적에 분포하는 비적을 자동으로 계수하게 하는 방식이다.

4.0 시약 및 표준 용액

4.1 에칭 용액

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

표 1. 에칭 조건의 예

검출소자	부식용액	에칭온도	에칭시간	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	전재식 외 1인

5.0 시료 채취 및 관리

5.1 시료채취 절차

알파비적검출기의 시료 채취 기간은 90일 또는 그 이상 일수 동안 측정하며 시료채취 시점은 검출기를 포장지에서 개봉 하면서부터 시작된다. 이때 반드시 검출기의 일련번호와 설치 날짜 및 시간을 기록한다. 측정이 시작됨에 따라 측정계획에 있어서 대상 측정지점의 급격한 환경변화가 예상될 경우, 알파비적검출기에 대한 라돈 측정이 수행되어서는 안 되며, 측정하려는 대상 공간의 평상시 조건에서 측정을 실시하여야 한다. 시료채취가 종료 되면 기밀이 가능한 포장지로 포장·보관하여 실험실까지 운반하여 분석한다.

5.2 측정 시 고려사항

측정기간 중 거주자에 대해 고려되어야 한다. 알파비적검출기를 이용한 측정은 측정기간 중 이동을 한다거나 건물을 철거하는 등의 지속적인 측정이 불가능한 사유가 발생하지 않는 지점을 선정하여야 한다.

6.0 정도보증/정도관리(QA/QC)

6.1 교정효율 산출

알파비적검출기를 사용하여 라돈 농도를 검출하고자 할 때는 검출소자에 알파입자에 의해 생성된 비적과 검출기가 노출된 라돈 농도와의 환산계수(C_F 또는 교정효율)를 산출해야 한다. 이는 반드시 측정에 앞서 수행되어야 하며 이 과정을 교정이라 이른다. 교정을 위해 라돈 검출기의 교정시설이 교정의 목적을 달성하기에 적합한 조건을 갖추고 있는지를 확인해야 한다. 따라서 교정은 공인교정기관을 통하여 교정을 수행하거나, 적어도 교정시설 내 기준 라돈 농도는 일차측정표준에 소급한 측정값이어야 한다. 교정시설 내의 환경조건(온도, 습도, 라돈농도, 공기흐름 등)은 교정효율에 영향을 줄 수 있기 때문에 라돈 검출기 교정시설은 온도 및 습도 등 환경조건을 안정하게 유지할 수 있는 능력을 갖추고 있어야 한다.

$$C_F = \frac{G - B}{E_x} \quad (\text{식 2})$$

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

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

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

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

6.2 교정효율 불확도 산출

알파비적검출기 교정효율의 불확도는 아래의 식으로 주어진다.

$$u(C_F) = \frac{1}{Ex} \sqrt{G + B + [C_F u(Ex)]^2} \quad (\text{식 3})$$

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

$u(Ex)$ (식 4) : 라돈 노출량 ($\text{h} \cdot \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)

6.3 정확도 관리

라돈 검출기의 정확도 관리를 위하여 교정은 적어도 12개월에 1회 이상 실시해야 하며, 3 개 이상의 서로 다른 라돈 농도에서 교정이 이루어져야 한다. 교정 시 20개 이상의 라돈검출기를 동시에 교정에 사용하여야 하며, 이들 중 1/4(5개) 이상은 바탕잡음 측정용으로 다른 교정용 검출기와 같은 이동 경로를 가지며 같이 처리/계수하여 교정 효율 산출에 반드시 반영하여야 한다.

6.4 정밀도

라돈검출기의 정밀도는 교정 시 사용된 검출기 측정값의 상대표준편차로 정의한다.

$$\text{정밀도}(\%) = [\text{표준편차/평균값}] \times 100 \quad (\text{식 4})$$

정밀도가 10 % 이상을 벗어나면 해당 배치의 검출소자는 사용을 중지하고 원인을 규명하여 적절한 조치를 취하거나 폐기한다.

6.5 바탕농도 관리

6.5.1 방법바탕농도(method blank concentration)

라돈검출기를 예칭하고 판독하는 실험실 내에서의 바탕농도와 라돈검출기 자체의 바탕농도 및 라돈검출기 분석기기 자체에서 발생하는 잡음로부터 오는 바탕농도이다. 주기적으로 실시하는 교정 시 반드시 바탕농도 측정하여 관련 검출기 배치의 사용 여부 결정 및 교정효율 산출에 이용하여야 한다. 측정된 바탕농도의 평균 준위가 15 Bq 이상이거나 바탕농도의 표준편차가 5 Bq 이상이면 사용을 중지한다.

6.5.2 현장바탕농도(field blank concentration)

온도 등 환경 변화에 따른 검출소자의 바탕농도 관리를 위해 측정지점별로 최소 1개 이상의 바탕검출기를 배치하고 라돈 측정용 검출기와 같은 이동경로를 따르도록 한다. 실제 라돈 농도 검출기와 같은 경로 및 과정을 거쳐 준비된 바탕농도 측정용 검출기의 결과값은 측정 결과에 반영하여야 한다.

6.6 검출소자 품질관리

검출소자 자체적으로 비적이 존재 할 수 있으며 이는 검출소자 본래의 흠집 또는 라돈 및 라돈자손에의 의도하지 않은 노출에 의해 기인된다. 따라서 이를 최소화하기 위해 사용 시까지 검출소자를 질소가 계속해서 주입되어 외부 공기가 들어오지 못하는 용기나 질소가 주입된 기밀용기에 보관하여야 한다.

6.7 운송 중 라돈의 노출

실제 측정 장소에서의 노출기간에 비하여 검출기의 운송시간은 일반적으로 매우 짧으므로 운송시간에 의한 비적의 생성은 대개의 경우 무시 가능하지만 운송기간 중 라돈에 노출될 우려가 있으므로 라돈이 스며들지 않도록 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.

7.0 분석절차

7.1 전처리

7.1.1 에칭

라돈에 노출된 검출소자는 현미경으로 비적을 계수하고 교정효율을 적용하여 라돈 농도를 산출한다. 이때 현미경으로 비적을 계수할 수 있도록 화학적 에칭과정을 거친다. 화학적 에칭은 라돈에 노출된 검출소자가 NaOH 또는 KOH 등과 같은 에칭용액에 담

가 검출기의 표면이 표면에칭율(bulk-etch rate)로 제거됨과 동시에 알파입자에 의한 손상부위는 비적에칭율(track-etch rate)로 에칭된다. 따라서 비적에 따른 에칭율이 표면제거에 따른 에칭율 보다 클 때 비적은 확대되어 그 직경이 광화학현미경으로 관찰할 수 있을 정도인 수 μm 이상에 이르게 됨에 따라 비적 계수가 가능하게 된다.

다양한 에너지의 알파입자로 생성된 비적은 에칭과정에서 에칭액의 종류, 에칭액의 농도 그리고 에칭 온도와 같은 표면에칭율과 비적에칭율에 영향을 끼치는 에칭 조건과 실험실 환경에 따라 크게 달라지므로 최적화된 에칭 조건, 즉 에칭율비가 최대가 되어 검출효율을 높일 수 있는 조합을 찾아 검출소자를 에칭한다.

8.0 결과보고

8.1 라돈 농도 산출

알파비적검출기를 이용하여 채취된 라돈의 농도는 내부의 검출소자를 꺼낸 다음 화학적 에칭과정을 거쳐 검출소자의 비적 수를 계수하여 산출한다. 이 때 바탕농도 검출기도 동일한 과정을 거쳐 비적 수를 얻는다.

$$C_{Rn} = \frac{(G - B)}{\Delta t C_F} \quad (\text{식 } 5)$$

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

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

8.2 시험결과의 정리

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

8.2.1 기기사양

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 측정결과

라돈 농도 표기 시 소수점 첫째 자리까지 표기한다.

9.0 참고자료

9.1 ISO 11665-1:2012, 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 11665-4:2012, 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 ^{222}Rn and ^{220}Rn 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 부록

“내용 없음”