

활성탄 검출기를 이용한 실내 라돈농도 측정

조찬희, 신상운, 손중권
전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

활성탄 검출기를 이용하여 실내 라돈농도를 측정하였다. 라돈농도 측정을 위한 활성탄 검출기의 노출기간은 4일, 5.8일, 5일이었다. 측정결과 사무실내 라돈농도는 각각 1.63 pCi/l, 1.23 pCi/l, 1.76 pCi/l였으며, 측정기간 동안 평균 1.54 pCi/l였다. 이 결과는 미국 환경보호청에서 제시한 조치준위의 최저치인 4 pCi/l 이하였다. 같은 장소에서 WL Meter를 이용하여 라돈 딸핵종의 농도를 측정한 결과, 각각 5.64 mWL, 4.88 mWL, 6.43 mWL이었다. 라돈과 라돈 딸핵종 농도로부터 라돈평형인자 값을 산출한 결과 각각 0.34, 0.39, 0.36으로, 이 결과는 다른 방법에 의해 타 연구자가 측정한 기존의 사무실내 라돈농도 및 라돈평형인자 산출결과와 비교적 유사했다. 따라서 활성탄 검출기를 이용한 라돈농도 측정법은 매우 유용한 방법임을 확인할 수 있었다.

1. 서 론

라돈은 원자번호 86번의 방사성 기체이며 대기중에는 ^{222}Rn (라돈), ^{220}Rn (토론), ^{219}Rn (악티논) 등이 존재한다. 이들은 모두 기체 상태이지만 라돈을 제외하고는 반감기가 짧아 고체 매질에서 대기로 확산되는 확률이 적어 관심의 대상이 되는 것은 원자량 222의 라돈이다. 라돈은 토양, 지하수, 건축자재 등 우라늄 혹은 라듐이 함유된 모든 물체에서 대기중으로 방출하며, Po, Pb, Bi 등으로 붕괴한다. 라돈과 라돈 딸핵종들은 호흡과 함께 폐속에 들어가서 붕괴과정을 통해 인체조직에 상당한 양의 에너지를 부과하여 폐암 등의 발병 원인이 되는 것으로 알려져 왔다. 따라서 각 국가 및 국제기구 등은 거주공간 및 작업장에서의 라돈농도 제한치를 설정하고 있으나, 국가마다 차이를 보이고 있다. 예를 들어 미국 환경보호청은 실내 라돈 준위가 4 pCi/l를 초과할 경우 인위적인 조치를 취하도록 권고하고 있다.

공기중 라돈의 농도를 측정하는 방법으로는 여러가지 방법[1]이 알려져 왔다. 여기서는 비교적 단기 라돈농도를 정확히 예측할 수 있는 활성탄 검출기법을 이용하여 사무실내 라돈농도를 측정하였으며, 또 WL Meter를 이용하여 라돈 딸핵종의 농도를 측정함으로써 사무실내 라돈평형인자를 산출하였다.

2. 활성탄 검출기를 이용한 라돈농도 측정

활성탄 검출기를 이용한 라돈농도 측정 원리는 분자확산에 의한 활성탄의 라돈 흡착능을 이용한다. 활성탄에 흡착된 라돈은 일정기간 (약 3시간)이 지나면 상대적으로 반감기가 짧은 라돈 딸

핵종들(^{214}Pb , ^{214}Bi)과 방사성 평형을 이루게 되는데, 이때 ^{214}Pb (295keV, 352keV)와 ^{214}Bi (609keV)의 감마 방사능을 계측하여 라돈농도를 예측한다[2]. 이와 같은 원리를 이용한 라돈농도 측정법은 Cohen[3], George[2], Prichard[4] 등에 의해 방법론이 제시되었고, 그 후 미국 환경보호청에서는 George의 방법론에 근거하여 활성탄 검출기를 이용한 라돈농도 측정법의 표준절차[5]를 제정하였으며 현재 미국내 일반 가정 및 작업장의 실내 라돈농도 측정시에도 이 표준절차가 활용되고 있다.

이 논문에서의 라돈농도 측정도 미국 환경보호청의 표준절차를 따라 측정하였으며, 이를 위해 미국 환경보호청이 보증한 활성탄 검출기를 구입하여 사용하였다. 측정에 사용된 활성탄 검출기는 직경이 4 인치인 알루미늄 캔으로 이루어져 있고 내부에 6x16 mesh 크기의 활성탄이 $70 \pm 1\text{g}$ 포함되어 있으며 활성탄층의 두께는 약 1.1 인치이다. 이번 실내 라돈농도 측정은 전력연구원의 한 사무실을 택해서 실시하였다. 실내 라돈농도 측정을 위한 활성탄 검출기는 보통 1일~7일 동안 노출하게 되는데, 이번 측정에서는 세차레에 걸쳐 4일(K-1), 5.8일(K-2), 5일(K-3) 동안 각각 공기중에 노출시켰다. 노출이 끝난 활성탄 검출기는 더 이상 공기의 유입이 없도록 하기 위해 뚜껑을 닫고 테이프로 밀봉하였다. 그 후 활성탄내에 흡착된 ^{222}Rn 와 그의 딸핵종 ^{214}Pb , ^{214}Bi 가 방사성평형을 이루도록 3시간 이상 방치해 두었다. 3시간 이상 경과한 후 노출시킨 활성탄 검출기를 Ge(Li) 계측기를 이용하여 미국 환경보호청의 절차에 따라 270 keV~720 keV까지의 단일 영역에서 감마 방사능을 계측하였으며 그 결과를 표 1에 나타냈다.

표 1. 활성탄 검출기의 노출조건 및 감마 방사능 계측값

검출기 번호	노출전 무게 (g)	노출후 무게 (g)	노출시작			노출종료			계측시간				감마 방사능 (270~720keV)	
			월	일	시간	월	일	시간	월	일	시작	종료	백그라운드	총 계수치
K-1	157.5	157.4	3	13	1830	3	17	1830	3	18	1010	1020	3097	3818
K-2	159.6	159.5	3	20	1410	3	26	0900	3	27	1540	1550	2947	3495
K-3	159.8	159.9	4	01	1030	4	06	1030	4	06	1430	1430	2651	3481

3. WL Meter를 이용한 라돈 딸핵종의 농도 측정

공기중의 라돈농도 측정 단위로는 앞에서 언급한 단위 부피당 라돈의 방사능 즉 pCi/l가 사용되나, 라돈 딸핵종에 대한 측정 단위로는 과거 우라늄 광산에 근무하는 광부들의 직업적인 피폭을 추정하는데 널리 사용되어 왔던 단위로서 WL(Working Level)을 흔히 사용한다. 1 WL은 공기 1ℓ 당 1.3×10^5 MeV의 알파 에너지를 방출하는 라돈 딸핵종들의 조합으로 정의된다. 만약 딸핵종들이 영속평형상태에 있다고 가정하면, 평형등가농도(EEC)는 다음과 같이 유도될 수 있다[1].

$$EEC = 0.105 \cdot A + 0.516 \cdot B + 0.379 \cdot C \quad (1)$$

여기서 평형등가농도 EEC는 pCi/l 단위로 표시될 수 있고, A, B, C는 라돈의 딸핵종인 ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi 의 농도이다. 1 WL은 영속평형상태에서 라돈 딸핵종들이 100 pCi/l의 농도로 혼합되었을 때를 말하며 다음과 같이 정의된다[1].

$$WL = \frac{EEC}{100} \quad (2)$$

또 라돈에 의한 피폭선량을 추정할 목적으로 평형상태가 적절한지를 보여주는 지표로 평형인자 (Equilibrium Factor; F)가 있으며 F는 다음과 같이 표시된다[1].

$$F = \frac{EEC}{\text{Radon Concentration}} \quad (3)$$

라돈 딸핵종의 농도를 측정하는 연속 라돈 WL 감시법은 공기 펌프를 사용하여 필터 표면에 라돈 딸핵종들을 수집한 후 실리콘 표면 장벽형 검출기나 알파 섬광 계수관을 이용하여 측정하는 방법이다. 이때 WL은 측정된 알파 입자 계수값, 교정상수, 공기 유입율, 공기 채취시간 등을 고려하여 구할 수 있다. 연속 라돈 WL 감시법은 휴대가 가능하므로 결과를 현장에서 즉시 알 수 있으며 WL의 실시간 값을 얻어낼 수 있으므로 실내 라돈농도의 다양한 변화에 대해 추적이 가능하다. 이번 측정에 사용된 WL Meter는 Thomson & Nielsen Electronics 사의 TN-WL-02 모델[6]을 사용하였으며 교정인자(CF') 값은 7.0 CPH/mWL였다.

4. 라돈 및 라돈 딸핵종 농도 측정 결과

활성탄을 이용한 라돈농도 측정에서는 활성탄에 흡착된 라돈과 방사성평형을 이루는 딸핵종 ^{214}Pb 및 ^{214}Bi 의 감마 방사능을 계측하여 다음의 경험식으로부터 계산되어 진다[5].

$$RN = \frac{\text{NET CPM}}{T_s \cdot E \cdot CF \cdot DF} \quad (4)$$

여기서 RN : 공기중의 라돈농도 (pCi/l)

NET CPM : 총 계수치에서 백그라운드 계수치를 뺀 순 계수치

T_s : 활성탄 검출기의 노출 시간 (min)

E : 표준 선원으로 부터의 계측효율 (CPM/pCi)

CF : 교정인자 (l/min)

DF : 노출의 중간 시점에서부터 계수 시작 시간까지의 붕괴인자, $DF = e^{-\frac{0.693t}{5501}}$

t : 노출의 중간 시점에서부터 계수 시작 시점까지의 시간(min)

활성탄의 라돈 흡착능은 습도의 영향에 비교적 민감하여[2], 이를 보정해 주기 위해 노출 기간 동안의 수분 증가분을 고려하여 교정인자(CF)를 다음과 같이 계산한다[5].

$$CF = CF_1 \frac{AF \text{ for actual exposure time}}{AF \text{ for 2 day exposure time}} \quad (5)$$

여기서 CF_1 및 AF 값은 미국 환경보호청에서 실험한 값을 사용할 수 있는데, CF_1 값은 2일 동안의 노출기간에 대한 활성탄 검출기의 수분 증가분에 따른 교정인자 값이고 AF 값은 노출기간에 따른 습도의 영향을 재보정해 주기 위한 값이다[5]. 표준선원에 대한 계측기의 계측효율을 측정하기 위해 미국 환경보호청이 보증한 17.7 nCi의 ^{226}Ra 선원이 함유된 표준 활성탄 캐니스터를 구입하여 계측하였다. 표준 활성탄 캐니스터의 크기 및 형태는 라돈농도 측정용 활성탄 검출기와 동

일한 것으로, 측정기간 동안 이 표준 활성탄 캐니스터를 사용하여 Ge(Li) 계측기의 계측효율을 수 차례 측정하여 평균 값을 산출한 결과 본 계산에 적용된 평균 계측효율 값인 $E = 0.161$ CPM/pCi를 얻었다.

신뢰도 분석을 위한 계수 오차는 다음의 식에 의해 계산되어 진다[5].

$$2-\sigma \text{ error} = 2 \frac{\sqrt{\text{Gross Counts} + \text{Background Counts}}}{\text{Gross Counts} - \text{Background Counts}} \quad (6)$$

식 (4)와 식 (5), 식 (6) 및 표 1로부터 계산한 라돈농도 값은 표 2에서 보는 바와 같이 $2-\sigma$ 오차 구간에서 K-1의 경우 $1.63 \text{ pCi}/\ell \pm 0.23$, K-2의 경우 $1.23 \text{ pCi}/\ell \pm 0.29$, 그리고 K-3의 경우 $1.76 \text{ pCi}/\ell \pm 0.18\%$ 등이었다.

표 2. 활성탄 검출기를 사용하여 측정한 사무실내 라돈농도

검출기 번호	교정인자(CF)	방사성 붕괴인자(DF)	계측효율(E) (CPM/pCi)	라돈농도 (pCi/ℓ)	2-σ 오차
K-1	0.077	0.618	0.161	1.63	0.23
K-2	0.059	0.563	0.161	1.23	0.29
K-3	0.066	0.616	0.161	1.76	0.18

WL Meter를 이용한 라돈 딸핵종의 농도 값은 다음의 식에 의하여 계산되어 진다[8].

$$RD = \frac{AC}{(T_p - 0.5) \times CF'} \quad (7)$$

여기서 RD : 라돈 딸핵종의 농도 (mWL)

AC : 필터로부터 방출되는 알파 입자 수의 비례 값으로서 WL Meter에 계측되는 값

T_p : 공기 샘플링 시간 (hr)

CF' : 교정인자 (CPH/mWL)

활성탄 검출기를 사용하여 라돈농도를 측정한 지역과 동일한 지역에서 WL Meter를 이용하여 3차례(R-1, R-2, R-3) 라돈 딸핵종의 농도를 측정한 결과를 표 3에 나타냈다.

표 3. WL Meter를 이용한 사무실내 라돈 딸핵종의 농도

No.	측정일시	공기 샘플링 시간 (hrs)	AC	Flow Rate (ℓ/min)	mWL
R-1	98-03-16/17	18	691	1	5.64
R-2	98-03-24/25	24	803	1	4.88
R-3	98-04-03/04	24	1059	1	6.43

활성탄 검출기를 사용한 라돈농도 측정결과(표 2)와 WL Meter를 이용한 라돈 딸핵종의 농도(표 3)를 측정일자에 따라 K-1과 R-1, K-2와 R-2, K-3와 R-3로 각각 대응시켜 식 (3)에 따라 라돈평형인자를 산출한 결과를 표 4에 나타냈다.

표 4. 사무실내 라돈과 라돈 딸핵종의 농도 및 라돈평형인자

No.	라돈농도 (pCi/ℓ)	라돈 딸핵종의 농도(mWL)	평형등가농도, EEC (pCi/ℓ)	라돈평형인자
K-R-1	1.63	5.64	0.564	0.34
K-R-2	1.23	4.88	0.488	0.39
K-R-3	1.76	6.43	0.643	0.36

표 4의 결과는 기존에 타 연구자[7]가 루카스셀과 집진필터를 이용하여 측정된 사무실내 라돈 농도(0.38~1.45 pCi/ℓ)와 라돈평형인자(0.25~0.63)의 결과와 비교적 유사하며, 또 다른 연구자[8]가 단일집진법에 의해 채취한 시료를 2π-비례계측기로 계측하여 산출한 사무실내 라돈 딸핵종의 농도(1.36~6.04 mWL)와 라돈평형인자(0.26~0.41)의 결과와도 잘 일치하는 것을 나타내 주고 있다.

4. 결론

- 1) 활성탄 검출기를 이용하여 사무실내 라돈농도를 측정된 결과 측정기간 동안 평균 1.54 pCi/ℓ 이었다.
- 2) 동일한 지역에서 WL Meter를 이용하여 라돈 딸핵종의 농도를 측정된 결과 측정기간 동안 평균 5.65 mWL이었다.
- 3) 실내 라돈농도와 라돈 딸핵종의 농도로부터 라돈평형인자 값은 0.35~0.39로서 이 결과는 타 연구자가 다른 방법을 통하여 평가한 결과의 범위내에 있음을 확인할 수 있었다.
- 4) 따라서 실내 라돈농도를 측정할 수 있도록 통제가 가능할 경우, 즉 인위적인 공기의 흐름을 발생시키지 않도록 통제가 가능할 경우 활성탄 검출기를 이용하여 라돈농도를 측정하는 것은 매우 유용한 방법임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. NCRP "Measurement of Radon and Radon Daughters in Air", NCRP Report No. 97, 1988.
2. A. C. George "Passive, Integrated Measurement of Indoor Radon Using Activated Carbon", Health Physics Vol. 46, 1984.
3. B. L. Cohen and E. S. Cohen "Theory and Practice of Radon Monitoring with Charcoal Adsorption", Health Physics Vol. 45, 1983.
4. H. M. Prichard and K. Marin "A Passive Diffusion Rn-222 Sampler Based on Activated Carbon Adsorption", Health Physics, Vol. 48, 1985.
5. D. J. Gray and S. T. Windham "EERF Standard Operating Procedure for ²²²Rn Measurements Using Charcoal Canisters", EPA 520/5-87-005, 1987.
6. Thomson & Nielsen Electronics LTD. "Radon WL Meter - Operator's Manual", 1990.
7. 박영웅, 하경우, 노성기 "공기중 라돈 및 라돈 자핵종의 농도 측정", 방사선방어학회지, 제14권, 제2호, 1989.
8. 장시영, 노성기, 홍중숙 "단일집진법에 의한 라돈 붕괴생성물의 농도 측정", 방사선방어학회지, 제6권, 제1호, 1981.