

라돈 표준실과 가옥 내에서 일부 라돈검출기에 대한 성능 평가

윤석원¹, 김용재^{2*}, 장병욱^{3*}, 변종인⁴, 윤주용^{5*}

¹과학기술연합대학원대학교, ²한국원자력안전기술원

2008년 8월 29일 접수 / 2008년 10월 29일 1차수정 / 2008년 10월 31일 채택

실내 라돈 검출기의 신뢰성 평가를 위해서 미국 Landauer사의 RadTrak[®], 헝가리 Radosys사의 Radopot[®], 그리고 미국 Rad elec사의 E-PERM[®] 검출기의 성능을 비교 검토하였다. RadTrak과 Radopot에 대한 라돈 표준 챔버 테스트 결과, AlphaGUARD[®] 검출 결과와 비교하여 각각 -13.2%, -6.0% 로 라돈 검출기 성능평가기준인 $\pm 20\%$ 이내에 포함되는 결과를 보였다. 또한, 실제 현장에서의 장기간 측정을 통한 성능을 평가하기 위하여 약 100여개의 가옥 내 동일한 장소에 각각의 검출기를 1년 동안 설치 하여 비교하였다. RadTrak과 Radopot의 비교에서는 매우 좋은 상관관계($R^2 = 0.91$)를 보였지만, E-PERM과 Radopot의 비교결과, 거의 상관성을 파악 할 수 없었다($R^2 = 0.021$). 또한, E-PERM을 이용한 연평균 전국 실내 공간감마선량을 등준위도는 Portable Ion Chamber를 이용한 전국 실외 공간감마선량을 등준위도와 다소 상이한 결과를 보였다. 실험 결과를 바탕으로 향후 대규모 라돈농도 조사에 필요한 검출기 선정 요건에 대해서 논의 하였다.

중심어: 라돈, 공간감마선량률, RadTrak[®], Radopot[®], E-PERM[®]

1. 서론

UNSCEAR 2000 보고서는 일반인이 자연환경에서 받는 연간 피폭선량의 전 세계 평균을 2.4 mSv yr^{-1} 로 보고 한 바 있다. 이 중 지하 내에 존재하는 천연 방사성 핵종과 우주선에 기인한 베타선, 감마선 등에 의한 피폭선량이 1.1 mSv yr^{-1} 이며, 라돈 및 딸핵종에 의한 피폭선량은 전체의 약 50%이상을 차지하는 1.3 mSv yr^{-1} 이다[1]. 또한, 한국원자력안전기술원에서 발표한 국민방사선위해도 평가 보고서에 따르면 자연방사선원에 의한 우리 국민의 총 피폭 유효선량은 2.99 mSv yr^{-1} 이며, 이 중 라돈 흡입에 의한 내부피폭이 1.41 mSv yr^{-1} 로 전체의 약 47% 정도를 차지하여 가장 높은 기여를 하는 것으로 평가되었다[2].

라돈은 일반적으로 가장 잘 알려진 천연방사성핵종 중 하나로서 무향, 무색의 불활성기체이며 붕괴과정에서 방사선을 방출한다. 라돈에 의한 피폭은 라돈붕괴에 의해 생성된 라돈 딸핵종이 호흡기관 표면에 침착되어 방출하는 알파선에 기인하므로, 피폭의 주요 원인은 라돈 자신보다는, 라돈 딸핵종들이며, 고농도의 라돈에 장기간 노출되는 경우 폐암을 유발 할 수 있다. 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection)에서는 신권고안을 통해각국의 라돈 참고준위를 수립할 것을 권고하고 있으며 [3], 현재 전 세계 여러 나라에서는 정부차원에서 대규모 실내

라돈 조사를 실시하는 추세에 있다. 이러한 조사결과를 바탕으로 라돈으로부터 받는 국민피폭선량을 평가하고 이를 바탕으로 방사선방호를 위한 적절한 정책을 수립하고 있다[4].

이러한 라돈농도의 측정방법은 라돈 및 그 딸핵종으로부터 방출되는 알파, 베타, 그리고 감마선을 검출하는 것이다. 대표적인 검출기로는 펄스전리함, 충전막 전리함, ZnS(Ag) 섬광검출기, 표면장벽형 실리콘 검출기 또는 확산접합형 검출기(Diffused junction detector)를 이용한 알파 스펙트로미터, NaI(Tl) 또는 HPGe를 이용한 감마 스펙트로미터와 알파입자의 비적을 검출하는 고체비적 검출기 등이 있다. 현재 많이 사용되고 있는 검출기의 종류로는 그 검출형태에 따라 적분형, 연속형 그리고 포집형으로 나누어지며, 또한 검출기의 작동 방식에 따라 능동형(active)과 수동형(passive)으로 구분된다. 이와 더불어 측정치를 연속적으로 지시하는 계수율계형과 누적된 노출량을 지시하는 적분형으로 구분할 수도 있다. 계수율계형 측정기는 즉시 측정에 주로 사용되며 검출 지역에서 라돈농도의 시간에 따른 변동추이를 측정하는데 유용하다. 이에 반해 적분형 검출기는 수주에서 수개월에 이르는 장기간 측정에 주로 사용되며, 일정기간 동안의 평균 라돈농도를 얻을 수 있다[4,5].

국가 차원에서 수행되는 대규모 라돈 농도 조사에 선정된 조사 지점의 여러 가지 환경적 요인이 검출기 성능에 영향을 미친다면, 지역을 대표하는 라돈 농도에 상당한 영향을 끼칠 수 있고, 그 평가 결과에 큰 영향을 미치게 된다. 그러므로 이러한 실험 외적인 요인에 대비하여 보다 신뢰성 결과를 확보하기 위하여 외부 조건의 영향을 상대적으로 덜 받는 라돈 검출기의 선정은 상당히 중요한 부분이라고 할 수 있다. 과거

책임저자: 장병욱, habada@kns.re.kr, 한국원자력안전기술원 대전광역시 유성구 과학로 34 한국원자력안전기술원 안전연구부 방사선연구실

한국원자력안전기술원에서 여러 차례 실시한 바 있는 전국 실내라돈농도조사에서의 경험으로 비추어 대규모 조사 수행 시 고려해야 할 중요한 요인은 경제성과 결과의 신뢰성이다. 전국 조사와 같은 경우에 상당히 많은 측정 지점수와 분기별로 설치·관리해야 하는 점을 감안 해 볼 때 대량의 라돈 검출기를 필요로 하므로, 검출기 선정 기준은 경제성과 동시에 실험 결과의 신뢰성을 종합적으로 검토해야 할 것이다.

본 연구에서는 시중에서 쉽게 구입이 가능하고, 외국의 여러 실험결과를 통해 신뢰성이 입증된 수동형 검출기중 일부를 선정하여 실제 가옥에서의 측정 결과 등을 비교검토하였다. 또한, 이러한 실험결과를 바탕으로 대규모 라돈 농도 조사계획 수립 시 합리적인 검출기 선정에 있어서 고려해야 할 중요한 요인들에 대해 논의 하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서 비교검토 된 라돈 검출기로는 검출부에 SSNTD (Solid-state nuclear track detector)의 한 종류인 CR-39를 사용하는 미국 Landauer Inc.의 RadTrak[®]과 (Fig. 1), 헝가리 Radosys Inc.의 Radopot[®] (Fig. 2), 그리고 Electret을 검출부로 사용하는 미국 Rad elec Inc.의 E-PERM[®] (Fig. 3) 이다.

Landauer Inc.의 RadTrak 검출기는 Fig. 1에서와 같이 컵의 바닥 부분에 검출부가 부착되어 있고, 개방된 다른 한쪽은 반투과성 멤브레인(semi-permeable membrane)이 부착되어 있다. 멤브레인은 불활성 기체가 컵 내부로 확산하려는 움직임을 지연시켜 주어 토론의 간섭을 방지하며 입자상으로 존재하는 라돈 딸핵종의 투과를 막아주는 역할을 한다[6]. 또한, 검출기

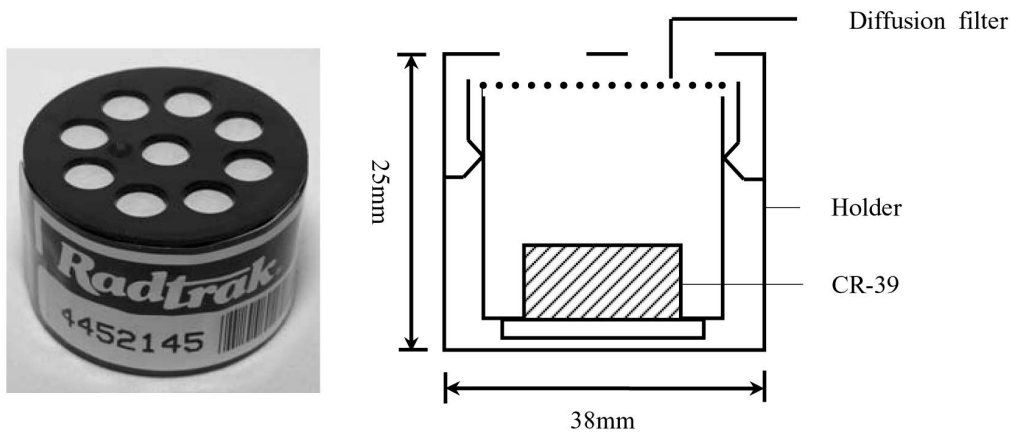


Fig. 1. A Picture and Section view of RadTrak detector (Landauer Inc.) using CR-39 which is a kind of SSNTD (Solid-State nuclear track detector). This detector consists of three parts; Diffusion filter, Holder, and CR-39 detector. Diffusion filter (semi-permeable membrane filter) encloses the top of the detectors in order to prevent the inflow of radon daughters into the chamber.

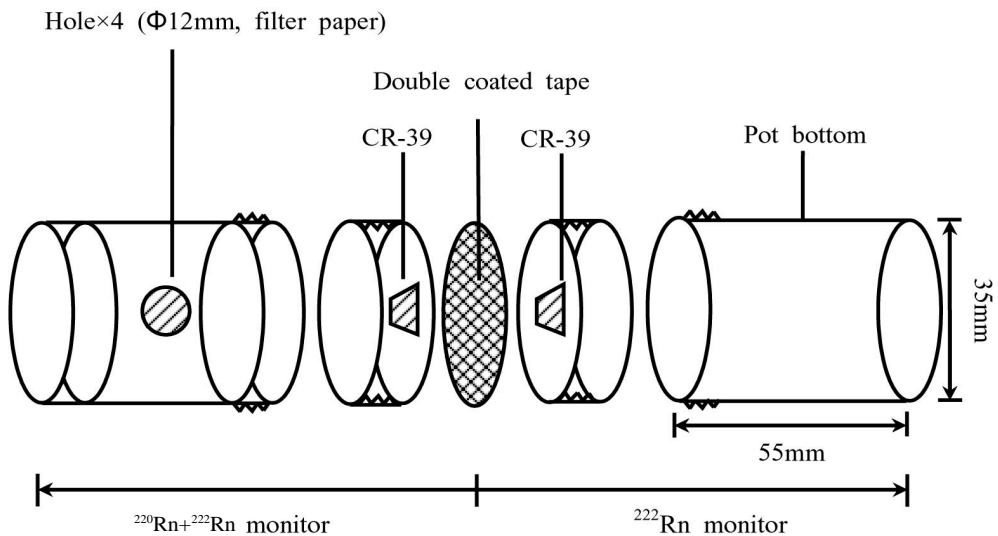


Fig. 2. Schematic diagram of Radopot (Radosys Inc.) using CR-39 which is a kind of SSNTD (Solid-state nuclear track detector). The Radopot consists of 2 sections; ²²²Rn and ²²⁰Rn monitor, and it has 4 holes (12mm in diameter) on the wall of the pot, which is sensitive to both radon and thoron. Radon and thoron concentrations can be obtained from the etch pit densities recorded on the two types of detector during exposure.

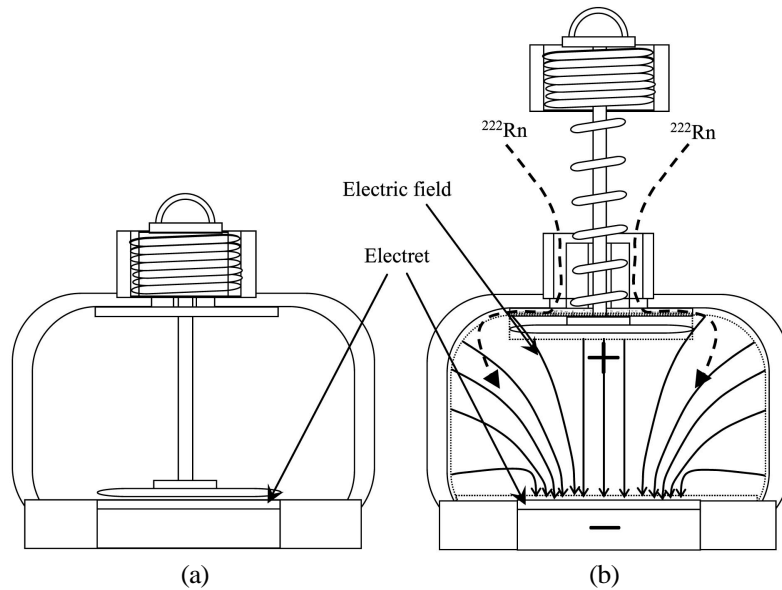


Fig. 3. Two section views of E-PERM detectors with (a) closed status and (b) open status. An E-PERM consists of a small cup or canister, having an electret at the bottom, and a filtered inlet at the top. The ^{222}Rn gas entering through the filter and the decay products formed inside the cup generate ions which are collected by the electret. The reduction of charge (or surface potential) on the electret is a measure of time integrated ^{222}Rn exposure.

표면은 라돈 딸핵종의 침착 및 붕괴에 따른 정전기적 방전을 방지하기 위해 Electrically Conducting Holder로 구성되어 있다.

헝가리 Radosys Inc.의 Radopot은 ^{222}Rn 과 ^{220}Rn 의 동시측정을 위해 두 개의 모니터로 구성되어 있으며 원통형 모양의 지름 35 mm, 높이 55 mm, 총 부피 110 cm^3 로 검출기 윗부분은 지름 12 mm 크기의 구멍이 있고 이 부분으로 토론의 내부 확산을 유도하는 구조이다. 하단은 라돈 모니터 부분으로 측정 전에 제거가 가능한 소형 접착제를 이용하여 CR-39 필름을 라돈 모니터 상단과 토론 모니터 하단 부분에 부착하였다. 공기 중 라돈 및 토론 측정을 위하여 검출기를 공기 중에 노출시키게 되면 공기 중 라돈 가스는 확산 작용에 의해 모니터 내로 확산되어 들어가게 된다. 공기 중에 일정기간 노출 후 모니터에 부착한 CR-39 검출부를 화학 에칭 과정을 거쳐 검출부 표면에 생긴 Track density를 이용하여 라돈 농도를 산출한다. 한편, 토론 측정을 위하여 토론 모니터의 벽에 4개의 구멍(ϕ 12 mm)을 만들고 cellulose fiber filter (Whatman No. 41)로 막아 모니터 내 공기순환 속도를 증가시키는 구조이다. 이 필터를 부착하는 목적은 공기 중에 존재하는 라돈 및 토론 딸핵종들의 라돈 및 토론 모니터 내 유입을 차단하기 위한 것이다.

미국 Rad Elec Inc.의 E-PERM 검출기는 충전막 전리함 형태의 검출기로 라돈 농도 및 공간감마선량을 측정할 수 있다는 장점이 있다. Fig. 3과 같이 E-PERM 검출기는 전리된 이온을 수집할 수 있도록 전기적으로 충전된 Teflon 충전막과 충전막을 고정시킬 수 있는 챔버(Electrically conducting holder), 일정시간 노출 후 충전막의 전하량을 판독하는데 필요한 판독기로 구성되어 있다.

본 연구에서 라돈 측정에는 SLT (S 챔버 + long-term electret) 형태의 E-PERM 검출기를 이용하였으며 공간감마선량 측정에는 SST (S 챔버 + short-term electret) 형태의 검출기를 사용하였다. 라돈 측정에 사용된 SLT 형태의 검출기 경우 교정상

수는 제조업체에서 제시한 값으로서 각각 0.1400과 0.0000525를 사용하였으며, 교정인자(CF : Calibration Factor)와 라돈농도는 식 (1)과 (2)를 이용하여 각각 계산하였다[8].

$$CF = 0.1400 + 0.0000525 \times \frac{(I+F)}{2} \quad (1)$$

I : 충전막의 초기 전압

F : 충전막의 최종 전압

$$\text{Radon concentration} = \frac{(I-F)}{CF \times \text{days}} - BG \quad (2)$$

BG : 공간감마선량률 $\times 0.087$

각각의 검출기 특성과 검출값의 신뢰도를 평가하기 위하여 실험은 크게 두 가지로 나누어 실시했다. 첫 번째, 미국 Landauer Inc.의 RadTrak[®]과 헝가리 Radosys Inc.의 Radopot[®]과 미국 Rad Elec Inc.의 E-PERM[®]을 각각 표준챔버에 노출시켜 독일 Genitron Inc.의 AlphaGUARD[®] 결과 값과 비교검토하였다. 보통 외국의 교차분석에서는 라돈농도를 알고 있는 표준 라돈 챔버 내에서 다양한 라돈 검출기를 노출시킨 후 라돈 농도를 정량하여 그 결과를 비교하는 방법을 사용하고 있다. 본 연구에서도 미국 NIST에서 생산된 ^{226}Ra 표준 시료를 표준 챔버(Genitron Inc. Inst., 210.5 L)에 넣고 약 1개월 간 챔버 내의 라돈 농도를 측정하였다. 비교 대상으로는 라돈 연속 감시기를 사용하였으며(AlphaGUARD[®], Genitron Inc.) 조사기간 동안 1시간 간격으로 라돈 농도를 측정토록 하였다. AlphaGUARD를 이용한 연속측정 결과가 과거 영국 NRPB (National Radiological Protection Board) 인증치와 비교, 1.5% 오차 이내에서 잘 일치하는 결과를 보이기 때문에 이 연속 측

정값을 기준으로 다른 검출기의 측정결과를 평가하였다.

두 번째로, 각각의 수동형 검출기를 실제 가옥 내에 노출 시켜 각 검출기의 결과를 비교·검토 하였다. 앞서 언급한 바와 같이 표준 챔버를 이용한 라돈농도는 일반적으로 자연 상태의 환경 중 라돈농도 보다 높고, 현장의 다양한 라돈농도 이외의 기온 및 습도 변동에 의해 영향을 받을 수 있으므로 자연준위의 라돈 농도 환경에서 라돈 농도 결과를 비교 해 보는 것은 매우 중요하다. 최적 조사 지점 선정과 조사지점의 통일성을 기하기 위하여 서울 100개 지역 아파트를 선정하였고, 각 분기별(3개월)로 1년 동안 가옥 내에 라돈 검출기를 설치하였다. 가옥 내 실험 지점은 일반 가정에서 주로 생활하는

거실 및 침실을 선정하였다. 검출기의 설치는 냉난방 기구나 TV등의 전자제품이 있는 곳을 피하여 천정이나 벽, 바닥으로부터 30 cm 이상 이격시켜 설치하였다.

또한, 실내라돈농도 계측뿐만 아니라 공간감마선량률 측정이 가능하다는 장점을 지닌 E-PERM의 성능을 평가해보기 위해 1993년부터 1996년 까지 한국원자력안전기술원 주관으로 HPIC (High Pressure Ion Chamber)를 이용해 전국에 걸쳐 실시된 실외 공간감마선량률 등준위도와 2002년부터 2004년까지 E-PERM 및 TLD (Thermoluminescence Dosimeter)을 이용해 각각 922, 150여개 가옥에서 실시한 실내 공간감마선량률 등준위도 결과를 바탕으로 검출기의 성능에 대한 신뢰

Table 1. The results of radon exposures measured by RadTrak[®] and AlphaGURAD[®] in the radon standard chamber.

List of detectors	Exposure period [day]	²²² Rn	Measured Rn exposure	Relative percent error
		concentration [Bq m ⁻³]	[kBq day m ⁻³]	
4515407	1	8054	8.1	-7.4 %
4515436	1	8627	8.6	-0.8 %
4515442	1	5652	5.7	-35.0 %
4515451	1	9201	9.2	5.8 %
4515452	1	7939	7.9	-8.7 %
4515456	1	7481	7.5	-14.0 %
4515457	1	7252	7.3	-16.6 %
4515458	1	7366	7.4	-15.3 %
4515459	1	7824	7.8	-10.1 %
4515460	1	6680	6.7	-23.2 %
4515473	2	7373	14.7	-13.3 %
4515474	2	7025	14.1	-17.4 %
4515476	2	6909	13.8	-18.7 %
4515477	2	6735	13.5	-20.8 %
4515479	2	7489	15.0	-11.9 %
4515480	2	7896	15.8	-7.1 %
4515481	2	7780	15.6	-8.5 %
4515482	2	7780	15.6	-8.5 %
4515484	2	7722	15.4	-9.2 %
4515485	2	8129	16.3	-4.4 %
4515502	4	7246	29.0	-17.0 %
4515504	4	7097	28.4	-18.7 %
4515505	4	7714	30.9	-11.6 %
4515506	4	7694	30.8	-11.8 %
4515507	4	7753	31.0	-11.1 %
4515508	4	6978	27.9	-20.0 %
4515511	4	7453	29.8	-14.6 %
4515512	4	6651	26.6	-23.8 %
4515514	4	7843	31.4	-10.1 %
4515516	4	7544	30.2	-13.5 %
Average				-13.2 %

성을 검토하여 보았다.

실외 공간감마선량 측정은 High Pressure Ion Chamber (RSS-131[®], Reuter-Stroke)를 이용하였으며, Sensor type은 가압전리함형으로 sensitivity는 20 mV $\mu\text{R}^{-1} \text{h}^{-1}$, 측정 범위는 각각 0~100 mR h⁻¹, 0~10 R h⁻¹, 정확도는 백그라운드에서 $\pm 5\%$, 시정수는 5 sec이다[9].

TLD 검출기는 Panasonic Inc.의 UD-814A1[®]을 사용하였으며, 4개 소자가 하나의 배지로 되어 있다. 조직등가소자인 Li₂B₄O₇:Cu과 저선량 측정을 위해 고감도 CaSO₄:Tm 소자가 각각 들어있다. 또한, 에너지 보상 필터로서 얇은 플라스틱 창과 두꺼운 플라스틱 창, 그리고 금속(Al, Pb, Cd, Sn) 필터가 부착되어 있다. 회수된 TLD는 Panasonic Inc.의 UD-716A[®] 판독장치를 이용하여 판독하였다[9,10].

3. 결과 및 논의

3.1 측정 결과

3.1.1 라돈 표준실 및 Field test 실험 결과

Radopot 검출기를 일정기간 공기 중에 노출시키게 되면 라돈 및 토론 모니터 내에 부착된 CR-39의 track density와 각 모니터에서의 라돈과 토론에 대한 conversion factor와 노출 시간으로 식 (1)과 (2)를 사용하여 라돈과 토론 농도를 계산하였다[11,12].

$$N_{Rn} = Q_{Rn} CF_{Rn1} T + Q_{Th} CF_{Th1} T + B \quad (1)$$

$$N_{Th} = Q_{Rn} CF_{Rn2} T + Q_{Th} CF_{Th2} T + B \quad (2)$$

Table 2. The results of radon exposures measured by Radopot[®] and AlphaGURAD[®] in the radon standard chamber.

List of detectors	Exposure period [day]	²²² Rn	Measured Rn exposure	Relative percent error
		concentration [Bq m ⁻³]	[kBq day m ⁻³]	
E35546	1	8565	8.6	-1.6 %
E35548	1	8194	8.2	-5.8 %
E35550	1	9863	9.9	13.4 %
E35552	1	9445	9.4	8.6 %
E35554	1	7405	7.4	-14.9 %
E35556	1	10188	10.2	17.1 %
E35558	1	7498	7.5	-13.8 %
E35560	1	7637	7.6	-12.2 %
E35562	1	8890	8.9	2.2 %
E35566	1	7683	7.7	-11.7 %
E35568	2	8201	16.4	-3.5 %
E35572	2	7783	15.6	-8.4 %
E35574	2	7204	14.4	-15.2 %
E35578	2	8410	16.8	-1.1 %
E35580	2	8271	16.5	-2.7 %
E35582	2	8363	16.7	-1.6 %
E35585	2	4955	9.9	-41.7 %
E35587	2	7482	15.0	-12.0 %
E35590	2	9360	18.7	10.1 %
E35592	2	8154	16.3	-4.1 %
E35594	4	9271	37.1	6.3 %
E35596	4	7950	31.8	-8.9 %
E35598	4	7219	28.9	-17.3 %
E35600	4	7973	31.9	-8.6 %
E35602	4	8958	35.8	2.7 %
E35604	4	7764	31.1	-11.0 %
E35606	4	7150	28.6	-18.1 %
E35608	4	7880	31.5	-9.7 %
E35613	4	7927	31.7	-9.1 %
Average				-6.0 %

여기서,

Q_{Rn} and Q_{Tn} : the mean concentrations of ^{222}Rn and ^{220}Rn in the exposed period [Bq m^{-3}]

CF_{Rn1} and CF_{Tn1} : ^{222}Rn and ^{220}Rn conversion factors for ^{222}Rn monitor [$\text{tracks cm}^{-2} (\text{kBq m}^{-3}\text{h}^{-1})^{-1}$]

CF_{Rn2} and CF_{Tn2} : ^{222}Rn and ^{220}Rn conversion factors for ^{220}Rn monitor [$\text{tracks cm}^{-2} (\text{kBq m}^{-3}\text{h}^{-1})^{-1}$]

T : exposure time [h]

B : background track density of CR-39 [cm^{-2}]

Table 1 과 2에 나타낸 바와 같이 RadTrak과 Radopot에

대한 표준챔버 테스트 결과, AlphaGUARD에서 측정된 결과와 비교하여 RadTrak은 -13.2%, Radopot은 -6.0%의 값으로 라돈 검출기에 대한 성능평가기준인 $\pm 20\%$ 이내의[13] 결과를 보여 주었다.

한편, 약 100개의 동일 가옥에 대해서 1년간 측정된 라돈 검출기별 상관성을 Fig. 4와 5에 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 RadTrak과 Radopot 두 검출기 간에 매우 좋은 상관관계($R^2 = 0.91$)를 보여주고 있다. 그러나 Fig. 5에서와 같이 위의 환경과 동일한 상황에서 Radopot과 E-PERM을 1년간 설치하여 얻은 결과를 비교한 결과, 두 검출기 간의 결과 값에서는 거의 상관성을 파악 할 수 없었다($R^2 = 0.021$).

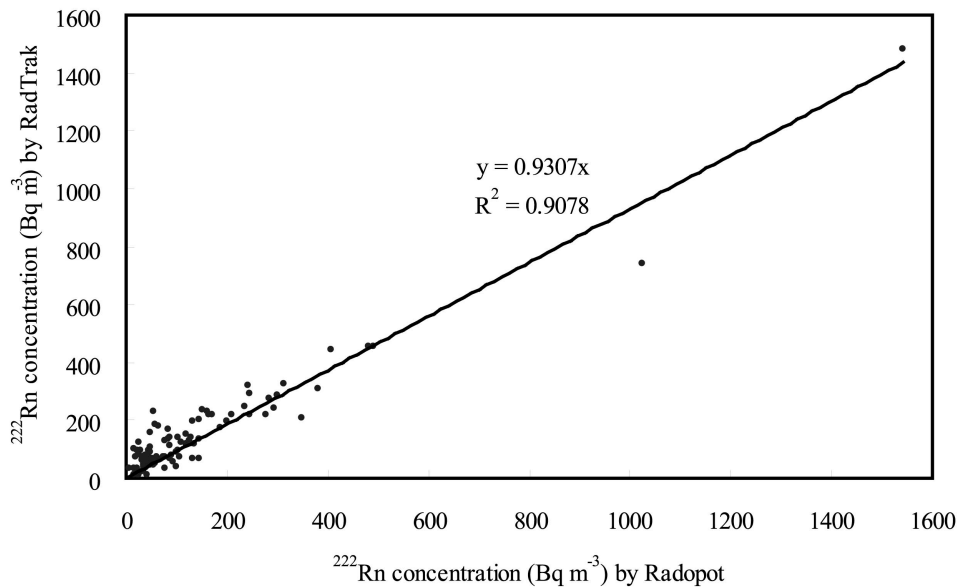


Fig. 4. Comparison of indoor ^{222}Rn concentration results measured by RadTrak and Radopot in approximately 100 dwellings for 1 year.

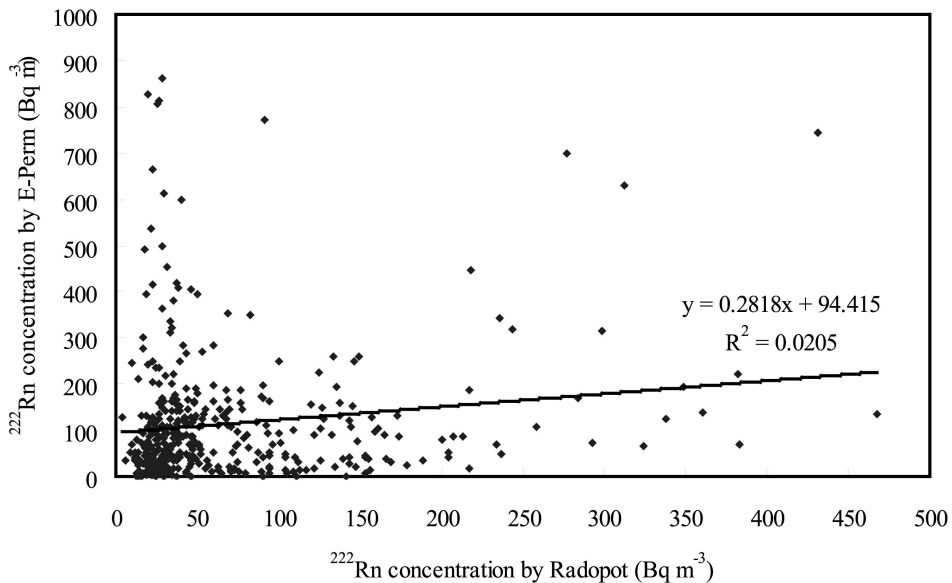


Fig. 5. Comparison of indoor ^{222}Rn concentration results measured by Radopot and E-PERM in approximately 100 dwellings for 1 year.

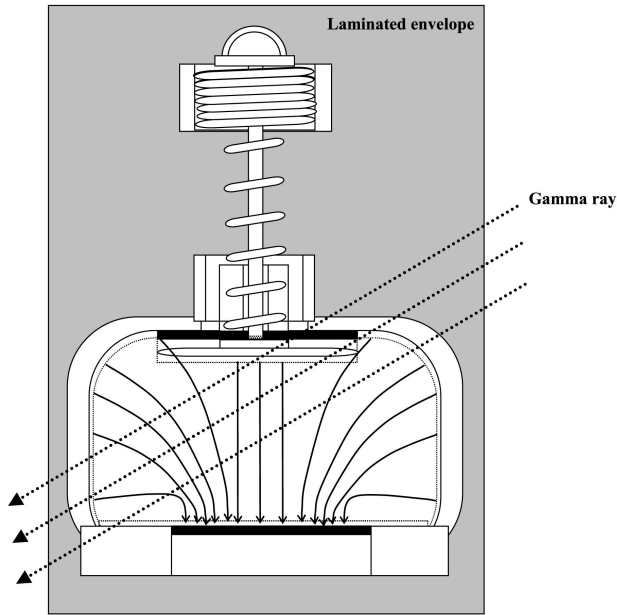


Fig. 6. E-PERM® enclosed in laminated envelope in order to prevent the contribution by radon in air.

3.1.2 전국 공간감마선량률 측정 결과

앞서 언급한 바와 같이 E-PERM의 다른 특징은 공간감마선량률 측정이다. 한편, E-PERM 장치는 공기와 등가이면서 에너지 의존성을 가지지 않는 재료로 만들어져 있어 감마선 측정에도 적합하다고 할 수 있다. 또한, ¹³⁷Cs이나 다른 종류의 표준감마선원을 사용하여 적절히 교정하면 여러 가지 혼합된 감마선 측정에도 이용 할 수 있다¹⁴⁾. Fig. 6에서와 같이 E-PERM을 이용한 공간감마선량률 측정시, 공기 중 존재하는 방사성 라돈 및 그 딸핵종에 의한 영향을 막기 위해 공기가

새어 들어가지 않는 포장용 팩이나 용기 안에서 완전히 밀봉한 상태로 측정함으로써 이루어진다.

Fig. 7 (a)과 같이 전국 922개 가옥에 대해 E-PERM을 이용한 공간감마선량률 등준위도는 Fig. 7 (c)의 HPIC (High Pressure Ion Chamber)를 이용한 전국 실외 공간감마선량률 등준위도와 다소 상이한 결과를 보여준다. 물론 실내·실외라는 계측 지점상의 차이는 존재하지만 E-PERM을 이용한 측정 결과에서는 서울·경기 지역이 그 주변지역에 비해 다소 낮은 경향을 보이는 반면, HPIC (High Pressure Ion Chamber)를 이용한 측정 결과에서는 충청·강원 지역이 높은 경향을 보이고 있다. 이 결과와 비교해 보기 위해 한국원자력안전기술원 주관으로 150개 가옥에 대해 열형광선량계 (Thermoluminescence dosimeter, TLD)를 이용해 작성한 등준위도(Fig. 7 (b))를 살펴보면 지점수의 차이는 존재하지만 전체적인 경향은 (c)와 유사하다.

3.2 논의

미국 Landauer Inc.의 RadTrak이나 헝가리 Radosys의 Radopot, 미국 Rad Elec Inc.의 E-PERM 검출기는 그 검출기 구조상의 견고함, 대규모 라돈 및 공간감마선량률 조사에 필요한 요건인 경제성, 더불어 E-PERM 검출기 같은 경우 세척 후 다시 측정에 사용 될 수 있도록 재활용이 가능하다는 점과 기존의 다른 알파비검출기와 다르게 검출 값 측정이 편리한 장점 등으로 인해서 미국을 비롯한 많은 국가에서 활용되고 있다. 실제로 과거 유럽에서 각 나라의 전문기관으로부터 대표적으로 쓰이고 있는 라돈 검출기를 대상으로 실시한 교차분석 결과를 살펴보면, 2004년 영국 NRPB (National Radiological Protection Board)에서 실시한 라돈 검출기 교차분석에서는 3가지 각기 다른조건으로 라돈 표준실 내 검출기를 노출하였고, 각각의 노출 조건을 살펴보면, 첫 번째는 중간 평형인자(Equilibrium factor 0.41)에서 51.67시간 동안 노출시켰고, 두 번째는 높은 평형인자(Equilibrium factor 0.95)

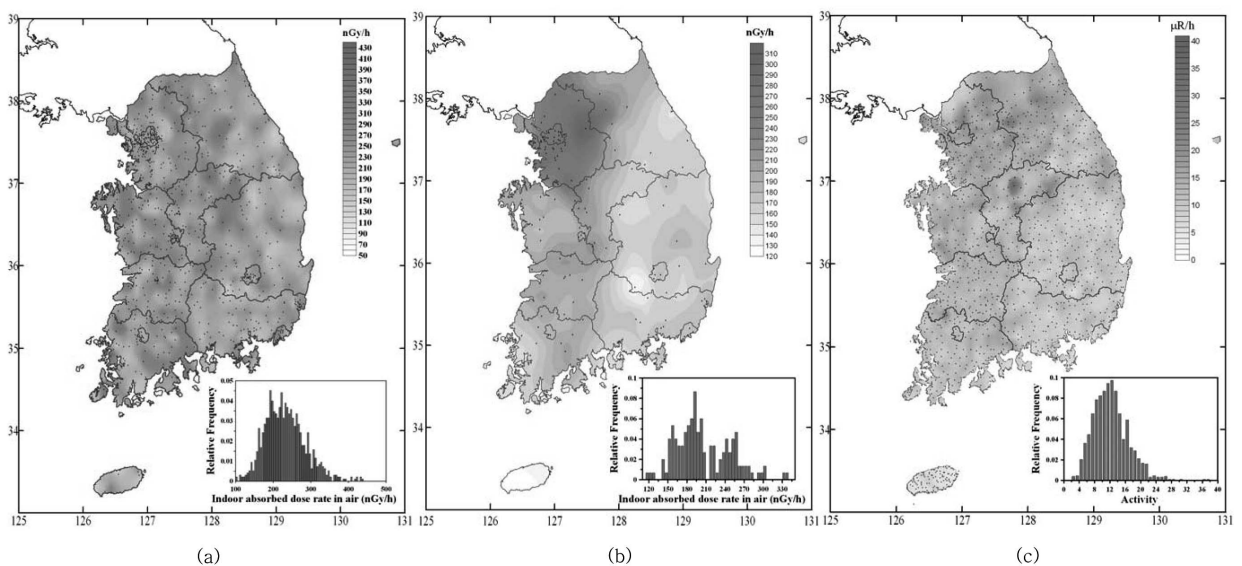


Fig. 7. Distribution maps of gamma dose rate level using (a) E-PERM, (b) TLD, and (c) HPIC (High Pressure Ion Chamber).

에서 263.42시간 동안, 세 번째는 낮은 평형인자(Equilibrium factor 0.17)에서 71.25시간 동안 각각 노출 시켰다. 세 가지 노출 조건에서 라돈 노출 농도(Radon exposure [kBq m³ h])는 각각 다르게 설정하였으며, 그 결과, 대부분의 알파비적검출기의 표준값과 계측 값의 차이와 표준편차 두 값이 각각 10% 미만으로 좋은 재현성 신뢰성을 보여주었으며, 대부분의 검출기는 검출부로 CR-39를 사용한 것들이었다. 또한, 검출기 표면에 라돈 딸핵종의 침착 및 붕괴에 따른 정전기적 방전을 방지하기 위해 Electrically conducting holder로 구성되어 있는 것과 동시에 실험 목적상 장기간의 평균 라돈농도를 나타내는 검출기 이므로 외부에 오랜 시간 노출되어 있으므로 분실 및 파손의 위험을 줄이기 위해 작은 크기(2 cm)로 설계된 검출기가 대부분인 것을 알 수 있었다. 한편, E-PERM 같은 경우, 위와 동일한 조건에 노출 되었을 때 표준 값과의 차이와 표준편차가 미국 EPA가 제안한 검출기 성능평가기준인 20% 이내에 드는 좋은 결과를 보여 주었다(13,15).

라돈 검출기가 외부 환경 조건에 어떤 영향을 받는지 알아보기 위해 2006년 스페인 INTE (Institute of Energetic Techniques)가 여러 가지 온도습도 조건에서 실시한 라돈 검출기 교차분석의 결과를 살펴보면, 온도 10°C~30°C, 습도 30%~80%에서 각 나라로부터 제출받은 라돈 검출기를 노출 시켰을 때, 각 검출기의 측정 결과는($C_{ref} / C_{measured}$), Radopot 0.98~1.27, Radosys RFSF 0.88~1.08, Canister 0.65~1.30, E-PERM 0.97~1.02, Raduet 0.99~1.16 등으로 대부분의 검출기가 온도와 습도 변화에도 안정적인 측정 결과를 보여주었으며, 특히 이들 검출기 중에서 E-PERM은 매우 안정적이었다 [16]. 그러나 본 연구에서는 표준챔버의 결과와는 다르게, Fig. 5에 나타낸 바와 같이 실제 가옥에서 E-PERM과 Radopot과의 결과는 상관성이 거의 없는 것으로 나타났다.

E-PERM은 충전막을 E-PERM 챔버 하단부에 장착한 다음 챔버 상단부를 열어 외부 공기가 챔버 내로 유입되도록 되어 있으며, 공기 유입부에는 외부로부터 먼지나 부유물의 유입을 막는 필터가 부착되어 있고, 라돈가스가 E-PERM 챔버 내부로 유입되면서 챔버 내의 라돈과 라돈의 딸핵종에 의해 방출된 방사선에 의해 충전막 위의 전하가 방전된다(17,18). 이러한 표준 챔버의 깨끗한 측정환경과는 달리 일반 가옥에서 3개월 정도의 장기측정에서 필터가 견고하게 부착되어 있지 못하면 실내 먼지의 유입으로 먼지에 부착된 라돈의 딸핵종에 의해 Electret의 표면전하를 방전시킬 가능성이 있는 것으로 사료된다. 실제로 회수된 E-PERM 중에서 필터가 견고하게 붙어 있지 못한 경우가 있었으며 또한, 우리나라 기후 특성상 여름철의 높은 습도에 의해 충전막의 전위가 약화 될 수도 있을 것으로 판단된다.

그러나 E-PERM 검출기는 측정현장에서 계산기와 전위계를 사용하면 바로 측정 결과를 알 수 있고, 충전된 전압이 남아 있다면 재사용이 가능한 장점이 있다. E-PERM은 필터 부분에 대한 개선만 이루어진다면, 빠른 판독과 재활용의 용이성 등으로 장점이 많은 검출기이기 때문에 E-PERM을 사용한 장기간의 실내라돈측정은 향후 보다 많은 검토 및 연구가 필요하다.

이러한 실험을 바탕으로 향후 실시하게 될 대규모 전국 라돈 농도 조사에서 적절한 검출기의 요건으로는 우선, 측정

지점의 온도습도 등 주위 환경으로부터 영향이 적은 검출기를 선택하여야 한다. 또한, 검출기 챔버는 내부로 유입된 라돈 가스와 그 딸핵종들의 침착 및 붕괴에 의한 정전기적 방전을 방지하기 위해 Electrically conducting holder로 구성된 검출기가 상대적으로 결과에 미치는 다른 영향에 비해 적기 때문에 보다 정확한 실험 결과를 얻을 수 있다. 그리고 많은 양의 검출기를 필요로 하기 때문에 저렴한 검출기를 선택하는 것이 좋다. 마지막으로 측정 지점에서 다양한 연령이 검출기를 접할 가능성이 있으므로 외부의 충격에 대비한 견고함을 갖춘 검출기가 보다 적합할 것이다.

4. 결론

일반적으로 시중에서 유통되는 라돈 농도 검출기에 대해 전국라돈조사 경험을 바탕으로 검출기의 성능을 비교평가 하였다. 표준선원을 이용한 표준챔버 테스트 결과에서 RadTrak과 Radopot 간의 결과는 매우 잘 일치하였다. 또한, 두 검출기 간의 실제 거주지에서의 장기간 측정 결과도 비교적 좋은 결과를 보여주었다. 하지만 Electret을 검출부로 사용하는 E-PERM 검출기는 동일 가옥 내에서 분기별 3개월 간 총 1년 동안 장기측정 시 Radopot과 상이한 결과가 나타났다. E-PERM의 다른 특징인 공간감마선량률 측정 성능을 알아보기 위해 실시한 실험 결과에서도 과거 공간감마선량률 등준위도 조사결과와 비교하여 상당한 차이가 있음을 알 수 있었다.

향후, 보다 정확한 검출기 성능 평가를 위해서 사계절이 분명한 우리나라의 기후 조건과 가옥 구조 및 검출기 설치회수, 처리과정상의 문제점 등을 종합적으로 반영한 검출기 별 체계적인 비교평가가 이뤄져야 할 것이며 이 논문의 평가 결과는 향후 국내에서 실시될 수 있는 대규모 실내라돈농도 조사에 사용 될 검출기를 선정하는 데 있어서 좋은 참고자료가 될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부가 시행한 원자력중장기 연구개발사업의 “국민방사선위해도 평가 (2005 - 2007)” 및 원자력기술개발 사업의 “생활환경중의 방사선 영향평가 (2007 - 2008)”의 일환으로 수행 되었습니다.

참고문헌

1. U.N. Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR Report 2000. New York. United Nations. 2000.
2. 한국원자력안전기술원. 국민 방사선 위해도 평가. 과학기술부. 2005.
3. ICRP. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Report No. 60. Annuals of the ICRP. UK:Pergamon Press.
4. 한국원자력안전기술원. 전국 실내 라돈 농도 및 공간감마선량률 준위 조사. 과학기술부. 2005.
5. Nikezic D, Yu KN. Formation and growth of tracks in nuclear track materials. Materials Science and Engineering. 2004. Report vol.46(3-5):51-123.
6. Durrani SA. Radon Measurement by Etched Track Detectors. World Scientific Press. 1997.
7. 김창규, 김용재. 서울, 인천, 경기지역 가옥내 라돈, 토론 및 토

- 론자핵종 농도분포 및 연평균 유효선량 평가. '03 추계방사선 방어학회 초록집, 2003.
8. Usman.S, Spitz H. Analysis of electret analysis ion chamber radon detector response to ^{222}Rn and interference from background gamma radiation. *Health Physics*. 1999;76(1):44-49.
 9. 한국원자력안전기술원. 전국환경방사능조사. 과학기술부, 2007.
 10. Panasonic Inc. TL Badge Technical Data. Matsushita Electric Industrial Co., LTD. 1985.
 11. Chen J, Tokonami S. Preliminary Results of Simultaneous Radon and Thoron Tests in Ottawa. *Radiation Protection Dosimetry*. 2008;1-4.
 12. Zhuo W, Tokonami S. A simple passive monitor for integrating measurements of indoor thoron concentrations. *Review of Scientific Inst.* 2002;73(8).
 13. Howarth CB. Results of the 2004 NRPB Intercomparison of Passive Radon Detectors. NRPB. U.K. 2004.
 14. Dorschel B, Pretzsch G. Optimization of Electret Ionization Chamber for Dosimetry in Mixed Neutron-Gamma Radiation Fields. *Radiation Protection Dosimetry*. 1984;9:43-47.
 15. 라돈 실태조사 지침 수립 연구. 환경부, 2007.
 16. Vargas A, Ortega X. Influence of Environmental Changes on Integrating Radon Detectors: Results of an Intercomparison Exercise. *Radiation Protection Dosimetry*. 2007;123(4):529-536.
 17. Kotrappa, P, Dempsey JC, Ramsey RW, Stieff LR. A practical E-PERM[®] (Electret passive environmental radon monitor) system for indoor ^{222}Rn measurement. *Health Physics*. 1990;58(4):461-467.
 18. Sessler GM. Electrets: recent developments. *Journal of Electrostatics*. 2001;51-52:137-145.

Performance Evaluation of Several Radon Detectors in the Standard Chamber and Dwellings

Seok-Won Yoon^{*}, Yong-Jae Kim^{**}, Byung-Uck Chang^{**}, Jong-In Byun^{*}, Ju-Yong Yun^{**}

^{*}Department of Measurement and Detection of Radiation, University of Science and Technology, [†]Korea Institute of Nuclear Safety

Abstract - To ensure the performance of radon detectors, three passive radon detectors (RadTrak[®], Radopot[®], and E-PERM[®]) have been reviewed. The difference ratios of RadTrak and Radopot tested in the radon standard chamber were -13.2% and -6.0%, respectively, which were in good accordance within 20% of the value measured by AlphaGUARD[®]. To ensure the performance of the long term measurement, the 3 detectors were installed at the same position of approximately one hundred of dwellings for one year. The correlation curve between RadTrak and Radopot shows good agreement with a correlation coefficient (R^2) of 0.91. However, The correlation curve between E-PERM and Radopot shows bad agreement ($R^2 = 0.021$). In addition, the distribution map of annual mean indoor gamma dose rate measured with E-PERM was not in accordance with the distribution map of outdoor gamma dose rate measured by Portable Ion Chamber. According to the results, some requisites for the selection of the radon passive detectors in the large-scale indoor radon survey were discussed.

Keywords : ^{222}Rn , Gamma dose rate, RadTrak[®], Radopot[®], E-PERM[®]