

## Development of Relative Calibration Method for Measurement of Radon and Application

Young-woong Park and Hyun-Soo Yang\*

Korea Atomic Energy Research Institute, \*Chung Nam National University

### 라돈농도 측정을 위한 고체비적검출기의 상대교정법 개발 및 응용

박영웅 · 양현수\*

한국원자력연구소, \*충남대학교공업화학과

**Abstract** - A relative-calibration-method of solid-state-track-detector for measurement of radon in air has been developed, and the concentration of radon in each room of a 15th-floor-apartment was measured by using the relative calibrated SSTD. There is a tendency to decrease the concentration of radon when the floor is higher, but the main factor to reduce the concentration of radon in room appeared to be ventilation rate. Average concentration of radon of the 15th-floor-apartment was  $1.50 \pm 0.51 \text{ pCi/l}$ , and the highest and the lowest concentration of radon were  $2.68 \pm 0.32 \text{ pCi/l}$ ,  $0.69 \pm 0.16 \text{ pCi/l}$  respectively.

*Key Words* : radon, solid state track detector, relative calibration, effective dose

**요약** - 공기 중의 라돈 농도를 측정하기 위한 고체비적검출기의 상대교정법을 개발하였으며, 상대 교정된 CN-85를 이용하여 15층 아파트 층 별로 실내 공기 중의 라돈 농도를 측정한 후 피폭 선량을 계산하여 보았다. 측정 결과 아파트 실내 공기 중에서의 라돈 농도는 대체적으로 상층으로 올라갈수록 감소하는 경향이 있었으나, 환기 횟수에 크게 영향을 받음을 알 수 있었다. 측정 값의 평균은  $1.50 \pm 0.51 \text{ pCi/l}$  였으며, 최대값과 최소값은 각각  $2.68 \pm 0.32 \text{ pCi/l}$ ,  $0.69 \pm 0.16 \text{ pCi/l}$  였다.

중심어 : 라돈, 고체비적검출기, 상대교정, 유효선량

### 서 론

자연 방사선에 의한 피폭선량의 절반 이상을 차지하는 공기 중 라돈의 농도 측정 및 라돈으로

인한 피폭선량의 예측에 관한 논문은 전 세계적으로 꾸준히 발표되고 있으며, 국내에서도 라돈 농도 측정 및 선량 예측 기술은 이미 확보된 상태이다. 피폭 선량 예측을 목적으로 공기 중의 라돈 농도를 측정하기 위해서는 고체비적검출기를

이용한 시간적분 라돈 농도 측정법이 주로 이용되고 있으나, 고체비적검출기는 방사선에 매우 민감한 물질이므로 시간의 경과에 따른 백그라운드의 증가 및 노화로 인하여 일시에 많은 양을 확보하여 보관하기 어려운 단점이 있다.

고체비적검출기에는 여러 종류가 있으나 라돈 농도 측정에는 주로 폴리카보네이트 계통의 CR-39[1]가 사용되고 있다. 그러나 CR-39뿐만 아니라 니트로셀룰로오스 계통의 CN-85등 검출기[2]의 알파선 검출 효율이 높으면 적절한 방법으로 교정하여 라돈 농도 측정에 이용할 수 있리라 여겨진다.

본 연구에서는 기존의 교정인자[1]를 이용하여 교정설비가 요구되지 않는 상대교정법을 개발하였고, CN-85를 상대 교정하여 15층 아파트 층 수 별로 실내 공기 중의 라돈 농도를 측정된 후 피폭선량을 계산하여 보았다.

## 이론 및 방법

### 상대교정 방법

본 연구에서는 고체비적검출기를 상대 교정하여 라돈 농도 측정에 이용할 수 있도록 하기 위하여 식(1)을 제시하였다. 식(1)에서 상대교정인자  $K_2$ 는 기준이 되는 교정된 고체비적검출 (CR-39)의 알파선 검출 효율과 교정이 되지 않은 다른 고체비적검출기의 알파선 검출 효율을 측정된 후, 교정된 CR-39의 알파선 검출 효율을 교정이 되지 않은 고체비적검출기의 알파선 검출 효율로 나눈 값이다.

$$C_{Rn} = K_1 \cdot K_2 \frac{Tr}{D} \quad (1)$$

$C_{Rn}$  : 공기 중의 평균 라돈농도 (pCi/ℓ)

$K_1$  : 1차교정인자  $[0.24 \pm 0.09(\text{pCi/l/day})/(\text{tr/cm}^2)]$   
[1]

$K_2$  : 상대교정인자

$Tr$  : CR-39에 생성된 비적수 (tr/cm<sup>2</sup>)

$D$  : 누적시간 (day)

### 검출효율 측정방법

라돈이 방출하는 알파선의 에너지는 5.49MeV

이므로, 라돈에서 방출된 알파선이 고체비적검출기에 도달할 때는 그 에너지가 0~5.49MeV의 혼합 에너지 범위에 있게 된다. 본 연구에서는 상대 교정인자를 결정하기 위하여 교정된 CR-39 및 상대 교정하고자 하는 고체비적검출기에 에너지가 0~5.49MeV 범위의 알파선을 조사한 후 검출 효율을 각각 측정하였다.

고체비적검출기에 도달하는 알파선을 0~5.49 MeV의 혼합 에너지의 알파선으로 만들기 위하여, 에너지가 4.62~5.49MeV인 알파선을 방출하는 서로 다른 3개의 알파 선원을 사용하여, 선원과 검출기 간의 거리를 변화시켜 검출기에 입사하는 알파선의 에너지가 0~5.49MeV 범위에 분포되도록 하였다. 알파선의 비적은 에너지와 비례 관계가 있으므로, 선원과 고체비적검출기 간의 거리를 변화시키는 경우 검출기에 입사하는 알파선의 비적은 식(2)와 같은 관계식으로 나타낼 수 있다[2].

$$R(mm) = (3.2 \times 10^{-1}) \cdot \frac{\sqrt{A_{eff}}}{\rho(\text{kg/m}^3)} \cdot [(0.05 \cdot T + 2.85) \cdot T^{3/2} - Y(mm)] \quad (2)$$

식(2)에서  $R$ 은 고체비적검출기에서의 알파선의 비적이며,  $A_{eff}$ 와  $\rho$ 는 각각 고체비적검출기의 유효 원자량과 밀도,  $T$ 는 알파선의 에너지(MeV), 그리고  $Y$ 는 선원과 검출기 간의 거리이다.

본 연구에서는 선원과 고체비적검출기의 거리를 0~4cm 범위 내에서 0.5cm 간격으로 변화시킨 각각의 거리에서 검출기에 도달하는 알파선의 검출 효율을 측정된 다음, 검출 효율의 평균값을 혼합 에너지 방사선 장에서의 알파선 검출 효율로 결정하였다.

상대 교정을 수행하기 위하여 사용된 <sup>241</sup>Am, <sup>239</sup>Pu, <sup>230</sup>Th의 3개의 알파 선원의 방사능은 각각 31427dpm/380mm<sup>2</sup>, 21700 dpm/380mm<sup>2</sup>, 11300 dpm/380mm<sup>2</sup>이며, 이들은 모두 지름이 2.2cm인 원판형이다. 각 선원의 방사능은 서로 다르며, 또한 선원과 고체비적검출기 사이의 거리 변화에 따라 검출기에 입사 되는 알파선의 수가 변하므로, 본 연구에서는 일정 구간의 에너지 영역에 대한 알파선의 검출 효율을 측정하기 위해서 같은 수의 알파선이 검출기에 입사 되는 시간을 바탕으로 조사 시간을 결정하였다. 선원과 고체비적검

출기 사이의 거리에 따른 검출기의 단위면적 (1mm<sup>2</sup>) 에 도달하는 알파선의 수가 42개 되는 시간을 계산하여 표1에 나타내었으며, 42개/mm<sup>2</sup> 을 이론표준값으로 정하였다. 또한 각각의 선원을 알파카운터(SAC-4,Eberline, U.S.A)의 검출부(단창면적:20mm<sup>2</sup>)에 밀착시켜 방사능을 측정하여 실험표준값으로 결정하였다. 최종적으로 이론표준값과 실험표준값의 평균값을 기준값으로 취하여 고체비적검출기의 알파선 검출 효율 계산에 이용하였다.

본 연구에서는 LEXAN과 CN-85고체비적검출기를 상대 교정하였으며, 이때 알파선을 조사시킨 LEXAN 및 기준이 되는 CR-39은 6.25N-NaOH 53℃ 수용액 내에서 13시간, CN-85는 2.5 N-NaOH 53℃ 수용액 내에서 1시간 에칭하였다. 에칭 후 각 고체비적검출기에 생성된 비적은 현미경에 연결된 CRT를 사용하여 600배로 확대하여 30회 측정하였으며, 그들의 평균값을 알파선 검출효율에 이용하였다.

Table 1. Exposure time to reach the same fluence of  $\alpha$ -particle(42particles/mm<sup>2</sup>)to the detector from three alpha sources.

Distance Y(mm)	Exposure Time(min:sec)		
	Th-252	Pu-230	Am-241
0	2:47	1:27	1:00
10	8:31	4:26	3:04
15	13:14	6:54	4:46
20	19:19	10:04	6:57
25	27:16	14:13	9:48
30	36:35	19:05	13:10
35	46:29	24:10	16:40
40	60:26	31:31	21:44

**라돈농도 측정**

상대 교정된 CN-85가 부착된 그림1의 라돈컵을 이용하여 고층 아파트 실내 공기 중의 라돈 농도를 측정한 후, 아파트 층별로 라돈 농도 분포를 조사하였다. 측정 대상 아파트는 15층 27평형으로 제한하였다. 각 층별로 1개의 라돈컵을 안방 바닥으로부터 약 1m 높이의 지점에 97년 1월 27일에 설치하고 97년 4월 27일 회수하여, 고체비적

검출기 검출효율 측정방법과 동일한 방법으로 판독하였다.

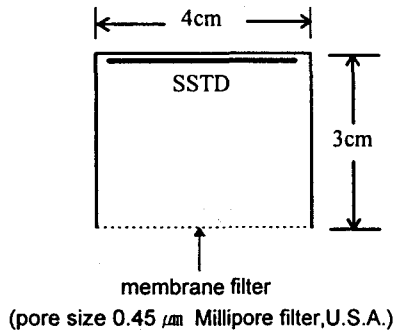


Fig. 1. The geometry of random-cup.

**피폭선량 예측**

라돈컵으로 측정한 라돈 농도값을 이용하여 인체의 라돈 피폭선량을 예측하기 위한 기술을 그림2에 나타내었다. 그림2에서 라돈 농도를 WL(Working level)로 나타내기 위한 방사평형인자(Equilibrium factor, F)[4]는 식(3)으로 표시된다. 방사평형인자는 에어로졸이 많은 공기에서는 높아지고 에어로졸이 적은 공기에서는 낮아지는 경향이 있다[5]. 일반 실내 공기에서의 방사평형인자는 0.07~0.90의 넓은 분포를 나타내지만 평균값은 약 0.4의 값을 나타내므로[6,7], 본 연구에서는 방사평형인자를 0.4로 가정하여 WL을 계산하였다. WL이란 공기 중의 라돈 농도가 100pCi/l 이고, 라돈과 라돈핵종들이 모두 방사 평형에 도달했을 때, 라돈자핵종들이 방출하는 알파선의 잠재된 에너지며, 1.3×10<sup>5</sup> MeV에 해당한다.

$$F = \frac{1}{C_{Rn}} (0.106 \cdot C_A + 0.514 \cdot C_B + 0.380 \cdot C_C) = 100 \cdot \frac{WL}{C_{Rn}} \quad (3)$$

식(3)에서 C<sub>Rn</sub>은 공기 중의 라돈 농도 이며, C<sub>A</sub>,C<sub>B</sub>,C<sub>C</sub> 는 각각 라돈자핵종 <sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Pb, 및 <sup>214</sup>Bi의 농도이다.

라돈의 자핵종은 유효 반감기가 30분인 단반감기의 핵종으로 구성되므로 선량계산 시에는 잠재-알파에너지(potential alpha energy)를 고려하여야 정확한 값을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 라

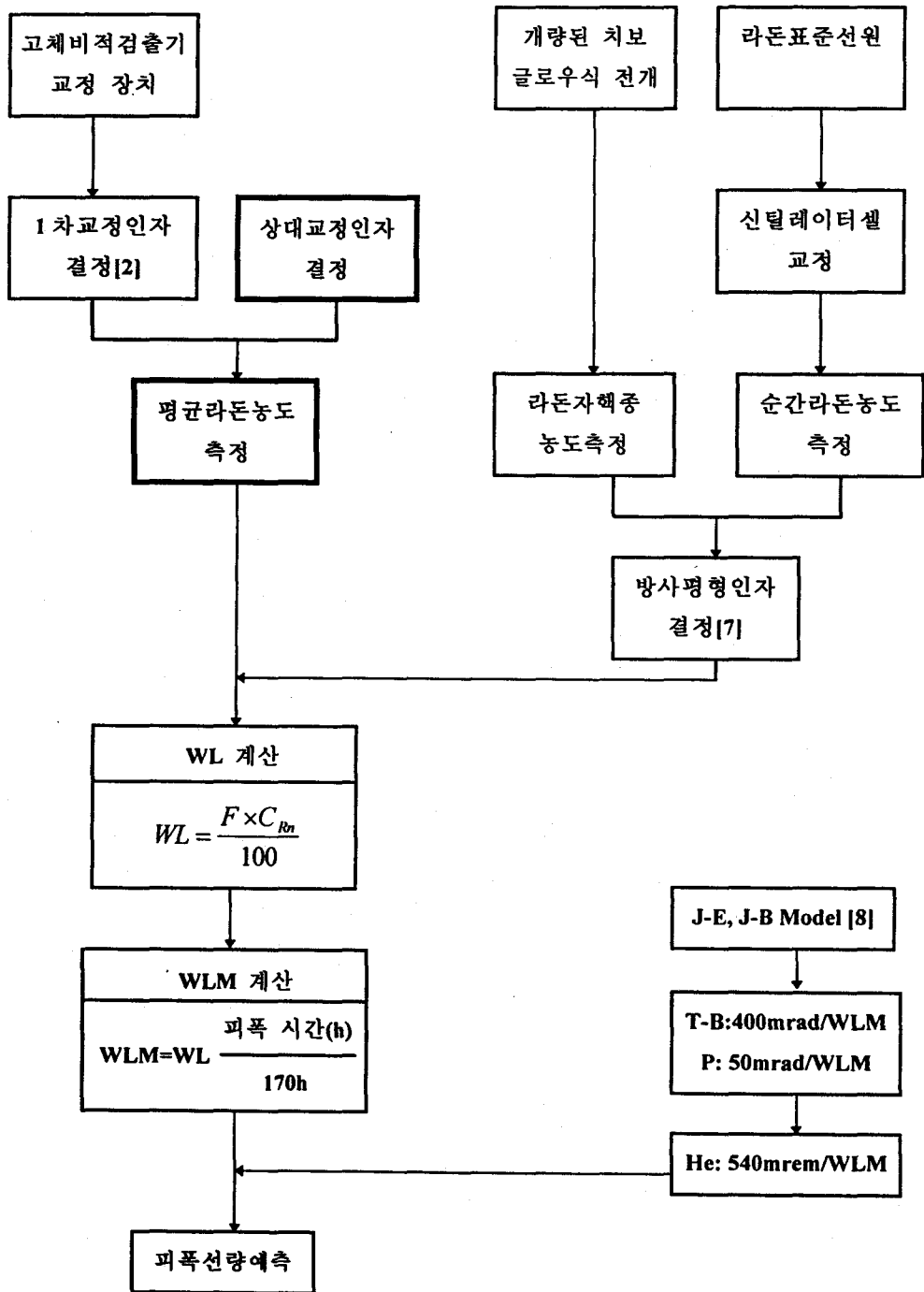


Fig. 2. Flow diagram of deriving effective dose from radon and its daughters in air.

돈 농도 측정값으로부터 WL과 WLM를 계산하고 그림2의 흡수선량환산인자(mrad/WLM)로부터 기도-기관지선량 및 폐 영역의 선량을 계산한 후, B전선에 대한 유효선량을 식(4)[8]으로부터 구하였다.

$$H_E = Q \times [W_{(T-B)} \cdot D_{(T-B)} + W_p \cdot D_p] \quad (4)$$

$H_E$  : 유효선량(mrem)

$Q$  : 알파입자의 선질인자(20)

$D_{(T-B)}$ ,  $D_p$  : 기도-기관지 및 폐 영역에서의 흡수선량(mrad)

$W_{(T-B)}$ ,  $W_p$  : 기도-기관지 및 폐 영역에서의 조직가중인자(0.06)

### 결과 및 고찰

#### 검출효율 측정 및 상대교정인자 결정

상대 교정을 수행하기 위해서는 1차교정인자 결정에 이용한 교정된 기준CR-39고체비적검출기와 교정이 되지 않은 고체비적검출기의 알파선 검출 효율을 같은 조건 하에서 측정하여야 한다. 1차교정인자를 결정하기 위해 사용된 CR-39는 제조일로부터 약 9년이 경과하였으므로 현재 CR-39의 백그라운드 비적수는 자연 방사선 및 화학변화에 의해 그림3과 같이 변화되어, 상대교정인자를 결정하기 위한 알파선 검출 효율 측정이 어렵게 되었다. 1차교정인자 결정에 이용되었던 백그라운드가 높은 CR-39과, 상대 교정하고자

하는CN-85 및 LEXAN에 동일한 시간 동안 알파선을 조사 시킨 후, 단위면적에 나타난 비적수를 측정된 값을 표2에 나타내었다.

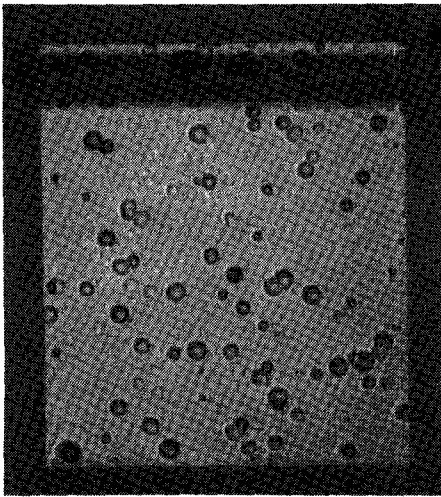
판독 결과 CR-39는 선원과 고체비적검출기의 거리가 가까운 경우와 먼 경우에는 선원으로부터 방출된 알파선에 의한 비적의 크기가 백그라운드 비적의 크기와 구분이 어렵기 때문에 판독이 불가능하였다. 다행히 선원과 검출기의 거리가 2.0~3.5cm인 경우에는 검출 효율이100% 이상으로 높으며, 비적은 크고 선명하므로 기타 영역에서도 검출 효율이 CN-85 및 LEXAN에 비해 높다고 가정한다.

고체비적검출기의 알파선 검출 효율을 결정하는데 필요한 실험표준값을 얻기 위하여 3개의 알파선원을 알파카운터(SAC-4,Eberline,U.S.A)의 검출기에 밀착하여 1분간 10회씩 측정하였다. 측정 결과를 평균한 값은  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{230}\text{Th}$  이 각각  $13665 \pm 133\text{cpm}$ ,  $9577 \pm 80\text{cpm}$ ,  $4936 \pm 39\text{cpm}$  였다. 각각의 측정값에 표1의  $Y=0$ 에 해당하는 시간을 곱한 값을 알파 선원의 단위면적으로 나눈 값은  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{230}\text{Th}$  이 각각  $36\text{개}/\text{mm}^2$ ,  $37\text{개}/\text{mm}^2$ ,  $36\text{개}/\text{mm}^2$ 로 이들을 평균한 값  $36\text{개}/\text{mm}^2$ 을 실험표준값으로 결정하였다. 앞에서 구한 이론 표준값  $42\text{개}/\text{mm}^2$ 와 실험표준값  $36\text{개}/\text{mm}^2$ 를 평균한 값은  $39\text{개}/\text{mm}^2$ 이므로 본 연구에서는  $39\text{개}/\text{mm}^2$ 를 알파선의 검출 효율로 나타내기 위한 기준값으로 사용하였다.

Table 2. The numbers of the  $\alpha$ -tracks within the area of  $1\text{mm}^2$  of CR-39, CN-85 and LEXAN various distance from the sources to the detectors.

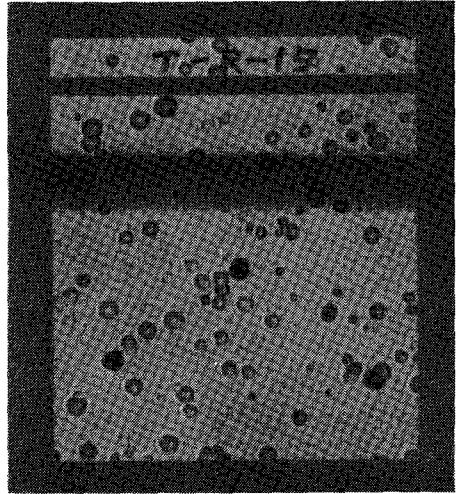
Y(mm)		0	10	15	20	25	30	35	40	ave.
		CR-39	AM-241	-	-	-	-	45	45	-
PU-219	-		-	-	45	64	-	-	-	-
TH-230	-		-	45	45	-	-	-	-	-
CN-85	AM-241	6	26	51	38	38	58	32	38	36
	PU-219	19	45	38	58	38	32	38	13	35
	TH-230	32	102	51	64	45	32	19	0	43
LEXAN	AM-241	26	13	26	13	19	45	38	19	25
	PU-219	13	13	19	13	26	38	45	19	23
	TH-230	13	6	13	26	38	32	13	0	18

\* - : impossible to detection



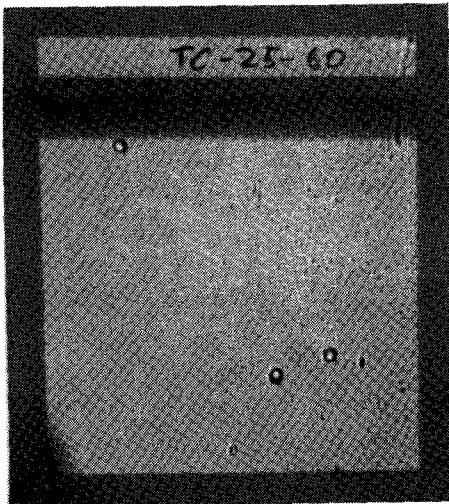
(x600)

CR-39 (B.G: 4,480 tr/mm<sup>2</sup>)  
(6.0-N NaOH, 53 °C, 13h)



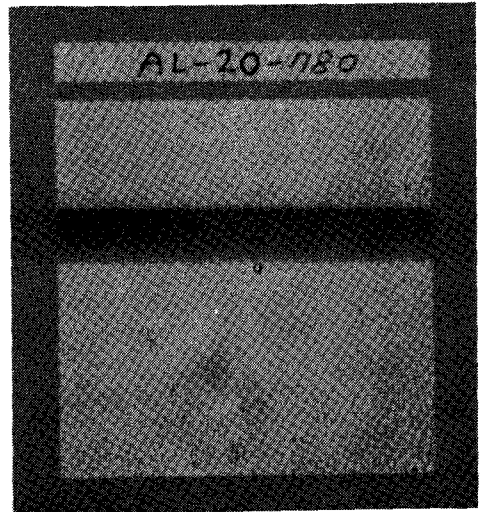
(x600)

CR-39  
(6.0-N NaOH, 53 °C, 13h)



(x600)

CN-85  
(2.5-N NaOH, 53 °C, 1h)



(x600)

LEXAN  
(6.0-N NaOH, 53 °C, 13h)

Fig. 3. A view of background on CR-39(9 years old), and a view of the  $\alpha$ -tracks on the CR-39, and on CN-85 and LEXAN.

고체비적검출기별 비적수의 평균값을 기준값으로 나누어 구한 알파선 검출 효율은 표2와 같이 CN-85 및 LEXAN 이 각각97%, 57%였다. CR-39의 알파선 검출 효율을 100%로 가정하였을 때, CN-85 및 LEXAN의 상대교정인자를 계산한 결과는 각각 1.03, 1.75 에 해당한다.

**라돈농도 측정 및 분포**

1997년 1월27일부터 4월27일 까지, 15층 아파트 각 층의 실내에서 라돈 농도를 측정한 후 결과를 표3과 그림4에 나타냈다. 대체로 저층에서는 비교적 높은 값을, 고층에서는 비교적 낮은 값을 나타내는 경향을 보였으며, 평균값은  $1.50 \pm 0.51\text{pCi/l}$ , 최대값 및 최소값은 9층 및 12층에서 각각  $2.68 \pm 0.32\text{pCi/l}$ ,  $0.69 \pm 0.16\text{pCi/l}$  였다.

측정 기간은 아파트 문을 열어놓지 않는 시간

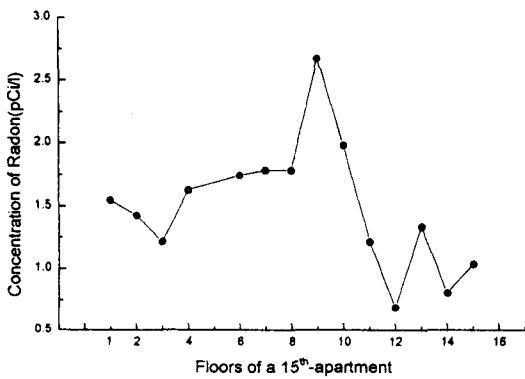


Fig. 4. Variation of radon concentration with each floor of 15<sup>th</sup>-apartment measured by CN-85.

이 많은 시기였으므로 측정값이 높으리라 예상했으나, 가장 높은 측정값을 나타낸 9층의 경우 원자력법에서 규정하고 있는 3pCi/l[9]를 초과하지 않음을 알 수 있었다. 9층에서 가장 높은 측정값을 나타낸 이유는 측정기간 동안 거의 환기를 시키지 않았기 때문이며, 12층에서 가장 낮은 측정값을 나타낸 이유는 매일 2회 규칙적으로 1시간~2시간 정도 환기를 했기 때문이다. 따라서 실내 공기 중의 라돈 농도는 대부분 콘크리트 바닥, 벽체 및 천정 등에 함유된 미량의 라듐에서 방출된 것이라는 것과, 아파트의 층 수와 상관 없이 자주 환기를 시키는 경우 실내 공기의 라돈 농도는 크게 감소한다는 것을 알 수 있었다.

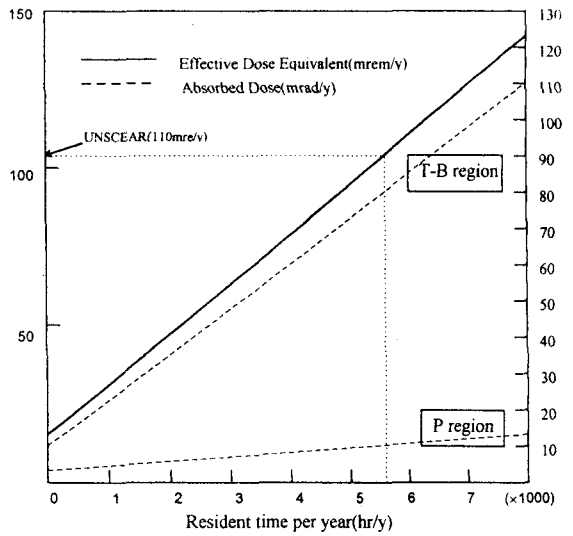


Fig. 5. Absorbed dose at T-B and P-region of lung, and resulting effective dose.

Table 3. Concentration of radon in each floor of a 15<sup>th</sup>- apartment measured by CN-85.

Floors	Conc. of Radon (pCi/l)	Floors	Conc. of Radon (pCi/l)
1	1.55 ± 0.23	9	2.68 ± 0.32
2	1.43 ± 0.23	10	1.99 ± 0.27
3	1.22 ± 0.21	11	1.22 ± 0.21
4	1.63 ± 0.24	12	0.69 ± 0.16
5	1.75 ± 0.26	13	1.34 ± 0.22
6	1.79 ± 0.26	14	0.81 ± 0.17
7	1.79 ± 0.26	15	1.04 ± 0.19

## 피폭선량 계산결과

측정기간 동안의 라돈 농도 측정값의 평균이 1년 동안의 평균값과 같고, 실내에서 활동하는 시간은 1일16시간, 그리고 실내 공기 중의 방사평형 인자를 0.4라고 가정하면, 라돈 농도 측정값을 그림2에 제시한 순서에 의하여 피폭선량으로 환산할 수 있다. 15층 아파트 각 층별 실내 공기의 라돈 농도를 측정한 후 평균한 값으로부터 연간 유효선량을 계산한 결과는  $111.2 \pm 37.8 \text{mrem/y}$ 였으며, 이 값은 그림5과 같이 유엔보고서에서 발표한 라돈에 의한 연간 유효선량  $110 \text{mrem}$ [11]과 거의 동일한 값을 알 수 있었다.

## 고 찰

15층 아파트 각 층별 실내 공기의 라돈 농도를 평균한 값은  $1.50 \pm 0.51 \text{pCi/l}$ 였다. 이 값은 1990년 하정우 등이[10] 국내 전지역을 대상으로 측정한 후 평균한 값  $1.56 \pm 0.40 \text{pCi/l}$ 와 거의 같은 값을 나타냈으므로, 본 연구에서 제시한 상대교정법은 건전하다고 판단된다.

## 결 론

1. 공기 중의 라돈 농도를 측정하기 위한 교체비적검출기 교정 시, 기존의 교정 방법에 해당하는 1차 교정에 의존하지 않고 원반형 표준 알파선원을 이용하는 상대교정법을 개발하여, 경제적이고 간편하게 검출기를 교정하여 라돈 농도에 이용할 수 있도록 하였다.
2. 에너지가 0~5.49MeV 인 혼합 알파선장에서 1차교정인자 결정에 이용되었던 CR-39 및 상대 교정하고자 하는 CN-85 및 LEXAN의 알파선 검출 효율을 측정하였다. CN-85 및 LEXAN의 알파선 검출 효율은 각각 97%, 57%였으며, 이로부터 구한 상대교정인자는 CN-85가 1.03였으며, LEXAN은 1.75였다.
3. 알파선 검출 효율이 좋은 CN-85를 이용하여 15층 아파트 층별 실내 공기 중의 라돈 농도를 측정한 결과 평균값은  $1.50 \pm 0.51 \text{pCi/l}$ 였으며, 최대값은 환기가 거의 이루어지지 않았던 9층에서  $2.68 \pm 0.32 \text{pCi/l}$ , 최소값은 1일 1~2회 환기한 12층에서  $0.69 \pm 0.16 \text{pCi/l}$ 였다. 실내 공기 중의 라돈 농도는 아파트의 층 수보다는 환

기 횡수에 크게 영향이 있음을 알 수 있었다.

4. 라돈 농도 측정값으로 전신에 대한 유효선량을 계산한 결과, 실내에서 활동하는 시간이 1일 16시간이라고 가정하면  $111.2 \pm 37.8 \text{mrem/y}$ 였으며, 이 값은 UN보고서에서 발표한  $110 \text{mrem/y}$ 와 거의 같은 값을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. 박영웅 외 3인, 공기 중의 라돈 농도 측정을 위한 CR-39의 교정, 대한방사선방어학회지, 14(2), 18-21(1989).
2. 박영웅, 양현수, 교체비적검출기의 알파선 검출 효율 측정에 관한 연구, 대한방사선방어학회지, 21(3), 167-173 (1996).
3. D.Bodansky, Overview of Indoor Radon Problem, in: *Indoor Radon and its Hazards*, University of Washington Press, Seattle and London, pp.9-23(1989).
4. G.Keller and K.H.Folkerts, Radon-222 concentration and decay product equilibrium in dwellings and in the open air., *Health Phys.*, 47, 385-395(1984).
5. S.A.Swedjemark, The Equilibrium Factor F, *Health Phys.*, 45, 453-462(1983).
6. M.A.Kobkin, Dosimetry Models, in: *Indoor Radon and its Hazards*, University of Washing Press, Seattle and London, pp.76-90(1989).
7. 박영웅 외2인, 공기 중의 라돈 및 라돈자핵종의 농도 측정, 방사선방어학회지, 14(2), 23-29 (1989).
8. OECD/NEA, *Dosimetry Aspect of Exposure to Radon and Thoron Daughter Products*, Paris(1983).
9. 방사선량 등에 관한 규정, 과학기술처고시, 90-11 (1990)
10. 하정우 등, 대기 중의 라돈 방사능에 의한 인체 피폭 선량 평가(II), KAERI/ RR-951/90 (1990).
11. United Nation, *Source, effect and risk of ionizing radiations*, UNSCEAR (1988).