

## Diurnal and Seasonal Variations of the Radon Progeny Concentrations in the open Atmosphere and the Influence of Meteorological Parameters

Dong-Myung Lee, Chang-Kyu Kim, Byung-Hwan Rho, Seung-Chan Lee\*,  
Hee-Dong Kang\*

Korea Institute of Nuclear safety, P.O. 1Box 114, Yusong  
Taejon, Korea 305-338

\*Department of Physics, Kyungpook National University, Taegu, Korea 702-701

### 대기중 라돈자핵종 농도의 일일 및 계절적 변화와 기상인자가 미치는 영향

이동명 · 김창규 · 노병환 · 이승찬\* · 강희동\*

한국원자력안전기술원

\*경북대학교 물리학과

(2000년 8월25일 접수, 2000년 11월30일 채택)

**Abstract** - Continuous measurements of radon progeny concentrations in the open atmosphere and measurements of meteorological parameters were performed in Taejon, using a continuous gross alpha/beta aerosol monitor and a weather measuring equipment between July 1999 and July 2000. These data were analyzed for half-hourly, daily, and seasonal variations. The distribution of daily averaged equilibrium equivalent radon concentration( $EEC_{Rn}$ ) had an arithmetic mean value of  $11.8 \pm 5.86 \text{ Bqm}^{-3}$  with the coefficient of variation of about 50% and the geometric mean was  $10.3 \text{ Bqm}^{-3}$ . The  $EEC_{Rn}$  varies between 0.83 and  $43.3 \text{ Bqm}^{-3}$ , depending on time of day and weather conditions. Half-hourly averaged data indicated a diurnal pattern with the outdoor  $EEC_{Rn}$  reaching a maximum at sunrise and a minimum at sunset. The pattern of the seasonal variation of the  $EEC_{Rn}$  in Taejon had a tendency of minimum concentration occurring in the summer(July) and maximum concentration occurring in the late autumn(November). But the seasonal variation of the  $EEC_{Rn}$  is expect to vary greatly from place to place. The outdoor  $EEC_{Rn}$  was highly dependent on the local climate features. Particularly the  $EEC_{Rn}$  rapidly drops less than  $5 \text{ Bqm}^{-3}$  in case of blowing heavily higher than wind speed of  $6 \text{ msec}^{-1}$ , reversely the days with more than  $30 \text{ Bqm}^{-3}$  were at a calm weather condition with the wind speed of lower than  $1 \text{ msec}^{-1}$ .

**Key Words** : radon progeny, equilibrium equivalent radon concentration, daily and seasonal variations, diurnal pattern, coefficient of variation, meteorological parameters.

**요약** - 1999년 7월부터 2000년 7월까지 대전지역에서 전알파/베타 대기부유진 연속모니터링 시스템과 기상측정 시스템을 이용하여 대기중 라돈자핵종 농도에 대한 시간별, 일별, 계절별 변동특성을 조사하였으며 동시에 기상인자가 미치는 영향을 고찰하였다. 그 결과 대기중 라돈자핵종의 일일평균 평형등가농도( $EEC_{Rn}$ ) 분포는 산술평균  $11.8 \pm 5.86 \text{ Bqm}^{-3}$ 과 기하평균  $10.3 \pm 4.57 \text{ Bqm}^{-3}$ 이었으며 일일 평균농도의 변동계수는 약 50%정도이었다. 매30분마다 측정된 라돈자핵종의 평형등가농도는 최소  $0.83 \text{ Bqm}^{-3}$ 에서 최대  $43.3 \text{ Bqm}^{-3}$ 까지 하루 중 측정시간과 그때의 기상조건에 따라 변화했으나, 일일변동의 양상은 일출시점과 일몰시점에서 각각 최고농도와 최저농도를 반복하는 주기적인 양상을 보였다. 대전지역에서의 평형등가농도는 계절적으로는 여름철이 낮고 늦가을이 높은 변동양상을 보여주었으나, 대기중 라돈자핵종 농도의 계절적 변동양상은 측정지역에 따라 달라질 수도 있을 것으로 예상된다. 대기중의 라돈자핵종 농도는 그 지역의 국지적 기상특성에 크게 좌우되었다. 특히 풍속이  $6 \text{ msec}^{-1}$  이상이 되면 대기중의 라돈자핵종 농도는  $5 \text{ Bqm}^{-3}$ 이하로 급격히 떨어지는 반면에 대기중의 라돈자핵종 농도가  $30 \text{ Bqm}^{-3}$  이상인 날은 풍속이  $1 \text{ msec}^{-1}$  이하의 매우 고요한 날이었다.

**중심어** : 라돈자핵종, 평형등가농도, 일일 및 계절적 변동, 일일변동양상, 변동계수, 기상인자.

## 서 론

우리 인간은 태초부터 방사선환경에서 생활을 해왔으며, 우리의 일상생활에서 받고 있는 방사선량 중 절반정도가 라돈에 기인된 것이다[1]. 라돈기체는 우리 주변에 있는 토양이나 암반중에 함유된 라듐의 붕괴과정에서 생성되어 지표면으로부터 탈출한 후 우리의 생활공간에 존재하게 된다. 이러한 라돈에 의한 인체피폭의 대부분은 호흡을 통한 단반감기 라돈자핵종들의 흡입에 의한 것으로 알려져 있다[2]. 이러한 라돈과 그 자핵종들의 흡입에 의한 피폭정도를 보다 정확히 평가하기 위해서는 대기중에서 이들의 거동특성에 대한 정확한 자료가 확보되어야 한다. 라돈 및 그 자핵종들의 대기중 거동특성에 대한 연구는 이미 많은 연구자들에 의해서 수행되었지만 각 나라마다의 환경 및 기상특성의 차이 등 다양한 환경요소 때문에 오늘날까지도 그 연구는 계속되고 있는 실정이다[3-7]. 또한 기존의 거동특성 연구는 주로 적분형의 라돈 검출기를 이용하거나 단기간 측정으로 얻어진 자료를 이용하였기 때문에 시간분해적(time-resolved) 라돈자핵종 농도의 해석에 있어서 많은 한계가 있었다. 따라서 우리 나라 환경에서의 그 거동특성을 고찰하여 라돈자핵종에 의한 우리 나라 국민들의 피폭선량평가에 도움이 되는 자료를 확보하고자 본 연구를 시작하게 되었다.

한국원자력안전기술원에서는 방사선 비상사태의 조기탐지를 위하여 전알파/베타 대기부유진 연속 모니터링 시스템(Gross Alpha/Beta Aerosol Continuous Monitor)을 설치 운영하고 있다. 이 시스템의 방사능 조기탐지 알고리즘은 자연백그라운드보상법(natural background compensation method)을 이용하고 있다. 즉 정상시의 대기중 전알파방사능은 라돈자핵종들만이 기여하고 있다고 가정하며, 이 값의 보상을 통하여 인공핵종의 기여 여부를 평가하는 것이다[8]. 따라서 이 시스템이 정상시 연속적으로 측정하고 있는 것은 대기부유진중의 전알파 방사능농도와 전베타 방사능농도로서 이를 이용하면 대기중의 라돈자핵종 농도에 대한 시간분해적인 해석을 위한 자료를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 조기탐지라는 시스템운영의 고유목적도 동시에 달성할 수 있다.

본 연구에서는 1999년 7월부터 2000년 7월까지 13개월에 걸쳐 위의 전알파/베타 대기부유진 연속모니터링 시스템과 기상측정 시스템으로 관측한 data를 이용하여 대기중의 라돈자핵종 농도에 대한 일별, 월별 및 계절별 변동특성을 고찰하였

으며, 동시에 동일지점에서 기상측정장비를 통해 수집한 풍속, 풍향, 대기습도, 대기압, 대기온도, 강우 등의 기상인자가 대기중의 라돈자핵종 농도 변화에 미치는 영향을 평가하였다.

## 재료 및 방법

### 측정 시스템

대기중의 라돈자핵종농도 측정지점은 한국원자력안전기술원내에 있는 방사선 모니터링포스트(N36° 22' 15", E127° 22' 13")로서, 이 시설은 방사선모니터링 전용의 건물이며 비교적 사방으로 개방된 지역에 위치하고 있다. 한편 이 시설 주변 지역의 background 조사를 위해 주변의 토양시료를 채취하여 방사능농도를 분석한 결과  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  및  $^{40}\text{K}$ 가 각각 31, 57, 843 Bqkg-dry<sup>-1</sup> 정도의 준위로서 각각 우리 나라 평균농도[9]와 비슷한 준위를 나타내었다.

대기부유진의 전알파와 방사능농도측정은 ESM Eberline사의 FAG FHT59S Aerosol Monitor를 사용하였다. 이 시스템은 시간당 8m<sup>3</sup>의 공기흡입률로 지상으로부터 약 3.5m에 위치하고 있는 공기흡입구를 통하여 대기중의 공기를 유입하고 동시에 유리섬유 필터지를 거쳐 배기 되도록 되어있다(그림 1). 30분 동안 대기부유진을 필터지에 여과함과 동시에 필터지에 흡착된 방사성핵종으로부터 방출되는 알파 및 베타 방사선을 ZnS/Plasitc Scintillation 검출기로 측정한다. 검출기의 유효면적은 50mm $\phi$ 이고, 효율은  $^{241}\text{Am}$  알파핵종에 대해서 10%정도이다. 검출하한농도는 시료채집과 동시측정의 경우 약 0.23 Bqm<sup>-3</sup>이고, 48시간 경과 후 측정하는 경우 약 0.007 Bqm<sup>-3</sup>이다. 6개의 교정상수를 이용하여 2개 채널의 계수율을 각각 알파 및 베타방사능으로 환산한다. 30분간의 시료채집과 측정이 끝나면 내부계산 프로그램에 의해서 30분간의 평균 전알파 방사능농도와 전베타 방사능농도를 계산하고 인공핵종에 의한 베타방사능농도를 자연백그라운드보상법을 이용해서 평가하도록 되어있다. 한편 기상측정 장비는 미국 Handar사 제품으로 온도, 습도, 대기압, 풍향/풍속, 강우량 등의 기상관측센서와 Data Logger로 구성되어 있으며, 매초마다 data를 수집한 후 5분 동안 평균하여 그 data를 local time과 함께 저장하도록 되어있다.

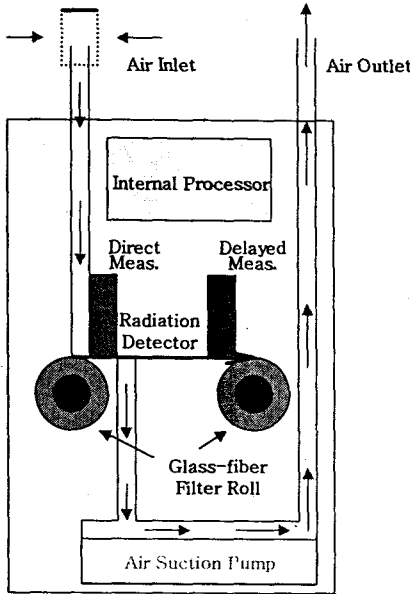


Fig. 1. Working principle of the FAG FHT59S aerosol monitor.

라돈자핵종 농도계산 알고리즘의 해석

대기중에 라돈과 그 자핵종들이 각각  $a_0(^{222}\text{Rn})$ ,  $a_1(^{218}\text{Po})$ ,  $a_2(^{214}\text{Pb})$ ,  $a_3(^{214}\text{Bi})$ ,  $a_4(^{214}\text{Po})$ 의 농도로서 혼합되어 있다고 가정할 때, 먼저 30분간의 시료 채취시간 동안 필터지에 성장되는 핵종의 농도는 아래와 같은 미분방정식과 경계조건에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= \frac{a_1\Phi}{\lambda_1} - \lambda_1 N_1 \quad (N_1 \equiv ^{218}\text{Po}) \\ \frac{dN_i}{dt} &= \frac{a_i\Phi}{\lambda_i} + \lambda_{i-1}N_{i-1} - \lambda_i N_i \\ \text{and } N_i(0) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$(i = 2(^{214}\text{Pb}), 3(^{214}\text{Bi}), 4(^{214}\text{Po}))$$

여기서  $\Phi$  ( $\text{m}^3\text{sec}^{-1}$ )는 공기흡입률을 나타내고  $\lambda_i$  ( $\text{sec}^{-1}$ )는  $i$  핵종의 붕괴상수이다. 위 (1)식의 해는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} N_i(t) &= P_i + \sum_{j=1}^i D_{ij} \exp(-\lambda_j t) \quad (2) \\ (0 \leq t \leq T) \end{aligned}$$

여기서  $T(=1800 \text{ sec})$ 는 시료채집시간을 나타내고,  $P_i$ 와  $D_{ij}$ 는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{a_1\Phi}{\lambda_1^2}, \quad D_{11} = -P_1, \\ P_i &= \frac{a_i\Phi}{\lambda_i^2} + \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i} P_{i-1} \quad (i > 1) \\ D_{ij} &= \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i - \lambda_j} D_{(i-1)j} \quad (i > 1, i \neq j) \text{ and} \\ D_{ii} &= -P_i - \sum_{j=1}^{i-1} D_{ij} \quad (i > 1) \end{aligned} \quad (3)$$

한편 30분간의 시료채집이 끝난 후( $t=T=1800 \text{ sec}$ ,  $t'=t-T$ ) 필터지에 흡착된 방사성핵종의 붕괴에 의한 방사능농도는 아래와 같은 미분방정식과 경계조건에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt'} &= -\lambda_1 N_1 \\ \frac{dN_i}{dt'} &= \lambda_{i-1} N_{i-1} - \lambda_i N_i \quad (i=2, 3, 4) \text{ and} \\ N_i(t'=0) &= N_i(t) \end{aligned} \quad (4)$$

위 (4)식의 해는  $t \geq T$ 인 경우 다음과 같이 주어진다.

$$N_i(t) = \sum_{j=1}^i C_{ij} \exp(-\lambda_j(t-T)) \quad (t \geq T), \quad (5)$$

여기서  $C_{ij}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_{11} &= N_1(T) \\ C_{ij} &= \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i - \lambda_j} C_{(i-1)j} \quad (i > 1, i \neq j) \\ C_{ii} &= N_i(T) - \sum_{j=1}^{i-1} C_{ij} \quad (i > 1) \end{aligned} \quad (6)$$

필터상의 방사능은 일반적인 관계식  $A_i(t) = \lambda_i N_i(t)$ 를 따르게 되고 전알파방사능은  $A_\alpha(t) = A_1(t) + A_4(t)$ 이 되고, 전베타방사능은  $A_\beta(t) = A_2(t) + A_3(t)$ 이 된다.

한편  $n$ 번째 측정주기에서의  $i$ 핵종의 평균방사능은 다음과 같이 주어진다.

$$\langle A_i \rangle_n = \frac{\lambda_i}{T} \int_{(n-1)T}^{nT} N_i(t) dt \quad (7)$$

대기중의 라돈과 그 자핵종들이 평형상태에 있다고 가정할 때 필터상에서 라돈자핵종의 방사능을 시간경과에 따라 그래프로 나타내면 그림 2와 같다. 이 그림에서 보는 바와 같이  $^{214}\text{Po}$ 의 방사능은  $^{214}\text{Bi}$ 의 방사능과 거의 같은 성장 및 붕괴를 나타내고 있다. 즉  $^{214}\text{Po}$ 는 반감기(164  $\mu\text{sec}$ )가 대단히 짧기 때문에 필터상에서 항상  $^{214}\text{Bi}$ 와 평형상태에 있다고 할 수 있다. 한편 대기중에 인공방사성핵종의 오염이 없고 라돈과 그 자핵종들이 평형상태에 있을 때 필터상에서의 전알파방사능과 전베타방사능의 비는 이론적으로 약 0.65 정도의 값을 가진다[8]. 그러나 실제로 이 비는 이 값보다 낮게 되고 이 비를 48시간 이상의 측정결과를 토대로 반 실험적인 방법으로 결정(약 0.5정도)을 한 후 다음과 같은 관계에 의해서 인공핵종에 의한 베타방사능을 계산하게 된다.

$$A_{\beta}^{art} = A_{\beta}^{gross} - A_{\beta}^{nat}$$

$$= A_{\beta}^{gross} - \frac{A_{\alpha}^{gross}}{F_{\alpha/\beta}}$$

$$F_{\alpha/\beta} = \frac{A_{\alpha}^{nat}}{A_{\beta}^{nat}} = \frac{A_{\alpha}^{gross}}{A_{\beta}^{gross}} \quad (8)$$

여기서  $A_{\beta}^{art}$ 는 인공핵종의 베타방사능이고,  $A_{\beta}^{gross}$ 는 전베타방사능,  $A_{\beta}^{nat}$ 는 자연핵종의 베타방사능,  $A_{\alpha}^{gross}$ 는 전알파방사능,  $A_{\alpha}^{nat}$ 는 자연핵종의 알파방사능이다.

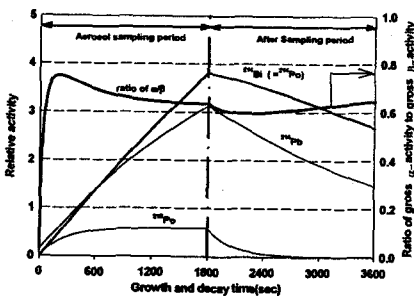


Fig. 2. Growth and decay curve of radon progeny on filter and variation of alpha : beta ratio.

실제로 대기중에서는 라돈과 그 자핵종들이 비평형상태로 혼합되어 있다. 이와 같이 혼합되어 있을 때 라돈자핵종들의 농도는 평형등가농도( $EEC_{Rn}$ )라는 물리량으로 나타내는데, 이것은 임의의 비평

형상태에서의 라돈자핵종들이 붕괴하는 과정에서 방출되는 잠재알파에너지농도에 해당하는 평형상태에서의 라돈농도로서 정의된다. 즉 이것은 아래 (9)식과 같이 라돈농도와 그 평형인자의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$EEC_{Rn} = E_p a_0 \approx 0.105 a_1 + 0.515 a_2 + 0.380 a_3 \quad (9)$$

여기서  $E_p$ 는 평형인자이고,  $a_0, a_1, a_2$  및  $a_3$ 는 각각  $^{222}\text{Rn}, ^{218}\text{Po}, ^{214}\text{Pb}, ^{214}\text{Bi}$ 의 방사능농도이다.

본 연구에서 사용된 시스템에 의해서 측정되는 전알파 방사능농도( $a_{\alpha}^{measured}$ )와 평형등가농도( $EEC_{Rn}$ )는 다음과 같은 반실험적 관계식으로 주어진다 [8,10].

$$EEC_{Rn} (= E_p a_0) = CF \times \frac{a_{\alpha}^{measured}}{2} \quad (10)$$

여기서 CF는 필터지에 흡착된 알파방출핵종의 자체흡수와 비부착성 라돈자핵종들의 불완전한 흡착으로 인하여 과소 평가되는 것을 보정하기 위한 상수값으로 일반적인 조건하에서 약 1.2정도 되는 것으로 알려져 있다[8,10]. Smetsers 등이 동일종류의 전알파/베타 대기부유진 연속모니터링 시스템을 이용하여 평형등가농도 측정시의 불확정도를 평가한 결과에 따르면 95% 신뢰범위에서 20 ~ 25% 정도의 불확정도를 지닌 것으로 보고하고 있다[8,10]. 그리고  $^{220}\text{Rn}$ 은 반감기가 55.6 sec로 대단히 짧기 때문에 지상 약 3.5 m 위치에 설치된 공기흡입구를 통하여  $^{220}\text{Rn}$  자핵종들이 인입될 확률은 대단히 작으므로 그 자핵종들의 기여는 무시할 수 있다.

## 결과 및 논의

### 일일 및 계절적 변화

1999년 7월 1일부터 2000년 7월 31일까지 한국원자력안전기술원내에 있는 방사선모니터링포스트에서 30분 간격으로 연속적으로 측정된 대기중의 전알파방사능농도를 이용하여 대기중 평형등가농도( $EEC_{Rn}$ )의 일일 및 계절적 변동특성을 고찰하였다.

그림 3은 비가 온 날의 측정자료를 제외한 30분 평균자료 전체를 계절별로 구분하고 각 시간대별로 평균한 것을 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 일출시점과 일몰시점에서 그 농도가

최고와 최저를 반복하는 경향을 나타내고 있으며, 일출시점에 따라 계절별로 하루 중 최고농도 시간대가 달라지고 있음을 보여주고 있다. 이러한 관계는 일사(日射)에 의한 대기중 혼합층이 일출과 동시에 발달하기 때문에 그 농도가 낮아지는 것으로 해석되고 있다[11, 12]. 즉 라돈 및 그 자핵종의 일일변동은 대기안정도의 변화로 설명될 수 있다. 다시 말해서 야간에 지상부근의 복사냉각으로 역전층이 발생하여 대기가 안정화됨에 따라 라돈의 수직적 혼합을 감소시켜서 일출직전까지 라돈의 농도를 증가시키게 된다. 그러나 일출에 따른 온도상승이 역전층을 소멸시키면 대기확산이 용이해져서 라돈은 상공높이까지 운반됨으로 지상부근의 라돈 및 그 자핵종의 농도는 크게 희석되어 일반적으로 오후에 최소농도가 된다.

한편 하루 중 최저농도에 대한 최고농도는 평균 약 3배 정도가 됨을 보여주고 있으며, 최고 약 14배의 차이를 보이고 있는 날도 있었다. 이와 같이 하루 사이에 큰 변동을 보이고 있는 날은 대부분 바람이 갑자기  $5\text{msec}^{-1}$  이상의 강풍이 일기 시작한 날로 대기중의 라돈자핵종 농도가 바람에 의해서 크게 희석되기 때문인 것으로 판단된다.

그림 4는 매일 48개 측정자료(30분 평균농도)를 이용하여 일일평균 농도를 구하고 이를 1년간의 빈도수로 나타낸 것이다. 측정지점에서의 일일 평균농도는 산술평균  $11.8 \pm 5.86\text{Bqm}^{-3}$ 과 기하평균  $10.3 \pm 4.57\text{Bqm}^{-3}$  정도인 것으로 나타났다. 일일 평균농도의 변동계수(variation coefficient)는 약 50% 정도로 다소 크게 나타나는 이유는 측정값의 통계적 편차가 아니라 라돈자핵종 농도의 실제적인 변동을 나타내기 때문이다.

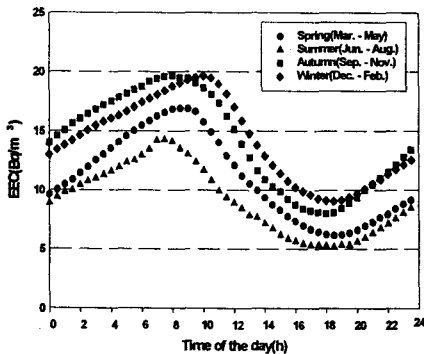


Fig. 3. Diurnal variation of the half-hourly averaged radon progeny concentration.

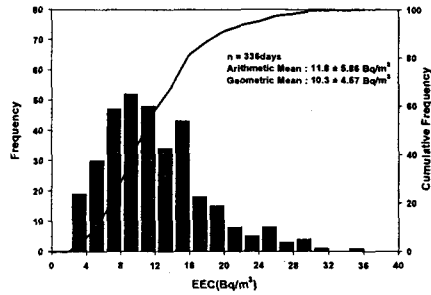


Fig. 4. A histogram of the daily averaged radon progeny concentrations measured 3.5m above the ground in Taejon during Jul. 1999 to Jun. 2000. The solid line represents the cumulative distribution of the data.

표 1은 매30분마다 측정된 라돈자핵종농도의 월별 산술평균값과 기하평균값을 정리한 것이다.

Table 1. Monthly averaged radon progeny concentration.

Month	# of Sampling Data	EEC <sub>Rn</sub> (Bqm <sup>-3</sup> )			Range
		Arithmetic Mean	SD	Geometric Mean	
1999/Jul.	1391	6.91	4.43	5.70	0.83~26.8
1999/Aug.	1021	9.18	5.97	7.36	0.99~28.0
1999/Sep.	1363	10.8	6.94	8.67	1.50~32.9
1999/Oct.	1387	11.6	6.83	9.58	1.79~38.7
1999/Nov.	1406	17.1	9.11	14.6	2.91~42.3
1999/Dec.	1488	16.2	9.00	13.8	3.18~43.3
2000/Jan.	1488	14.1	6.82	12.5	2.45~41.2
2000/Feb.	1303	12.2	7.03	10.2	2.28~31.5
2000/Mar.	1488	11.2	6.41	9.47	1.89~33.3
2000/Apr.	1377	10.2	5.58	8.81	2.19~32.5
2000/May	1071	11.2	6.32	9.64	2.49~32.0
2000/Jun.	1250	9.93	6.07	8.43	1.68~38.2
2000/Jul.	1360	7.52	4.52	6.27	1.18~24.8
Annual (1999/Jul.					
Daily	~	11.8	5.86	10.3	0.83~43.3
Average 2000/Jun.)					

# ; Number

SD ; Standard Deviation

라돈 및 그 자핵종 농도의 계절적 변동은 측정 지역에서 토양으로부터의 라돈발산률, 대기안정도, 지리적조건 등에 의존하는 것으로 보고되고 있다 [12]. 즉 토양으로부터의 라돈발산률은 토양의 수분함량이 낮은 여름에 크고 적설이나 지면동결 때문에 겨울철에는 적어진다고 보고하고 있다. 한편 대기안정도는 일반적으로 봄철과 여름철이 불안정하며 가을에서 겨울이 안정하기 때문에 대기혼합은 봄에서 여름철이 크게되어 라돈농도를 낮게 하는 것으로 알려져 있다. 그리고 지리적 위치에 따라서는 해양성기단의 영향을 받으면 라돈농도는 낮아지며 계절풍 등으로 대륙성 공기의 공급을 받으면 라돈농도는 높아지는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 효과들이 중첩이 되어 나타나기 때문에 나라마다 심지어 측정지점마다 계절적 변동은 달라질 수 있다.

이러한 예로서 미국동부지역(뉴저지주), 이집트, 브라질(리오데자네이로)은 봄에는 낮고 여름에서 가을이 높은 경향을 가지고 있는 반면에, 미국서부지역(캘리포니아), 일본, 스페인, 인도(봄베이) 러시아(모스크바) 등에서는 여름에 낮고 겨울에 높은 계절적 특성을 지니고 있다. 또한 핀란드와 같이 계절적 변동이 명확하게 나타나지 않는 나라도 있다[13].

그림 5는 평형등가농도의 일일평균값을 측정된 시간순서에 따라 1년간에 걸쳐 그 변화양상을 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 늦가을에서 초겨울이 높고 초여름이 낮은 경향을 보여주고 있으며, 그 농도는 측정 시스템의 측정오차 약 20~25%를 고려하더라도 여러 가지 환경적인 요인에 의해서 큰 변동을 하고 있음을 알 수 있다. 이러한 변동에 대한 보다 자세한 해석을 위해 기상인자의 영향을 다음과 같이 고찰하였다.

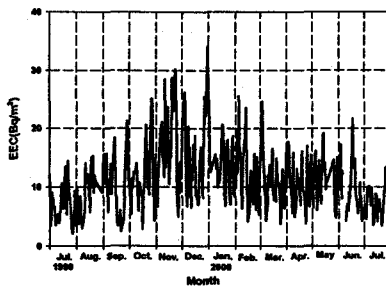


Fig. 5. A time series plot of the daily averaged radon progeny concentration measured 3.5m above the ground in Taejon during Jul. 1999 to Jul. 2000.

기상인자와의 관계

그림 6은 라돈자핵종 농도의 일일변동폭이 가장 큰 날(2000년 2월 14일)에 있어서 매시간별 기상인자와 평형등가농도의 변동양상을 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 그 전날의 경우 정상적인 일일변동 양상을 나타내고 있는 반면에, 바람이 강하게 불면서 대기중의 상대습도가 낮은 경우에 평형등가농도가 급격히 낮아지는 모습을 보이고 있으며 또한 정상적인 일일변동 양상이 흐트러짐을 볼 수 있다. 이와 같이 하루 중에 평형등가농도가 심하게 차이를 보이는 주된 원인은 바람인 것으로 판단되며, 이 그림에서 보는 바와 같이 바람이 불기 시작하면서 대기중의 라돈자핵종의 농도는 급격히 떨어지고 비교적 강풍이 지속적 으로 불 경우에는 일일의 주기적인 변동양상이 사라지게 됨을 알 수 있다.

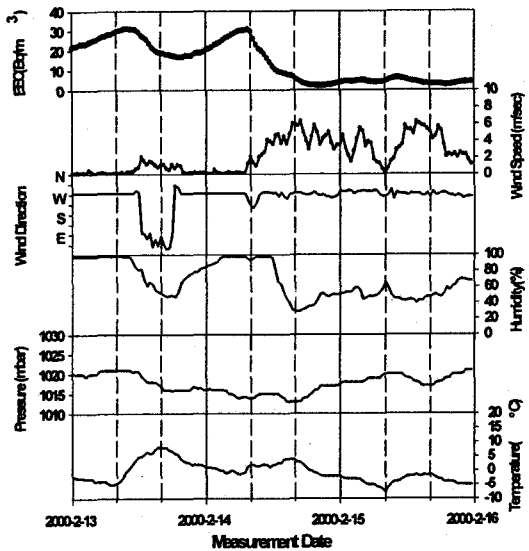


Fig. 6. Diurnal variation of half-hourly averaged radon progeny concentration, wind speed, wind direction, ambient relative humidity, ambient pressure and ambient temperature.

그림 7은 1년간 동시적으로 측정된 풍속과 라돈자핵종농도 15,100 개의 측정값(30분 평균값)을 2차원 평면상에 나타낸 것으로 이들 사이의 상관관계를 지수함수적으로 나타낸 결과 R<sup>2</sup>값이 0.243 정도이었다. 또한 이 그림에서 보는 바와 같이 풍속이 6 msec<sup>-1</sup> 이상이 되면 라돈자핵종농도는 약 5 Bqm<sup>-3</sup>이하로 떨어짐을 알 수 있으며, 30 Bqm<sup>-3</sup> 이상의 라돈자핵종농도를 나타낸 시간은 풍속이

약  $1 \text{ msec}^{-1}$  이하의 매우 고요한 상태이었음을 알 수 있다. 즉 라돈 및 그 자핵종들의 지표로부터의 수직적 확산과 풍속과는 비례관계에 있기 때문에 [14] 대기중 라돈자핵종 농도와 풍속은 상호 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다.

그림 8은 대기중의 상대습도와 라돈자핵종 농도에 대해서 계절별로 5일씩 맑은 날을 택해서 동시에 상호 비교하여 나타낸 그림이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 대기습도와 평형등가농도는

하루 중 같은 주기의 변동양상을 보여주고 있으며, 건조하고 바람이 강한 봄날의 경우 상대적으로 그 농도가 매우 낮음을 볼 수 있다. 이것은 대기중의 습도가 낮을수록 라돈자핵종의 농도에 직접 영향을 미치기보다는 야간에 습도가 높고 주간 습도가 낮은 일반적인 기상특성과 봄철의 경우 대기가 불안정하기 때문에 상대적으로 라돈자핵종의 농도가 낮은 계절적 변동특성의 영향이 훨씬 지배적일 것으로 생각된다.

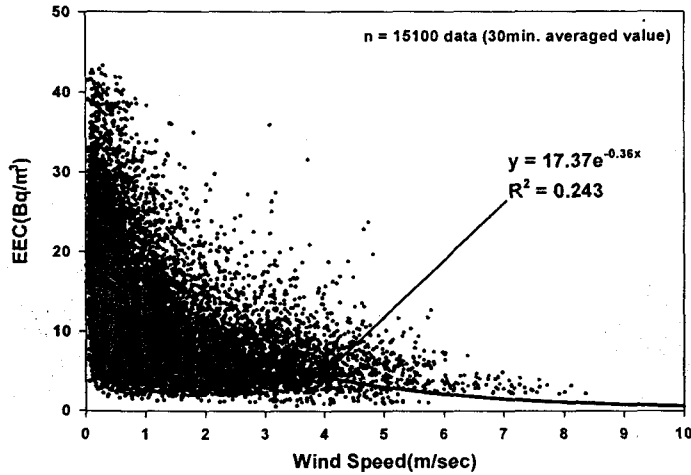


Fig. 7. Dependence of the half-hourly averaged radon progeny concentration on wind speed, excluding rainy days.

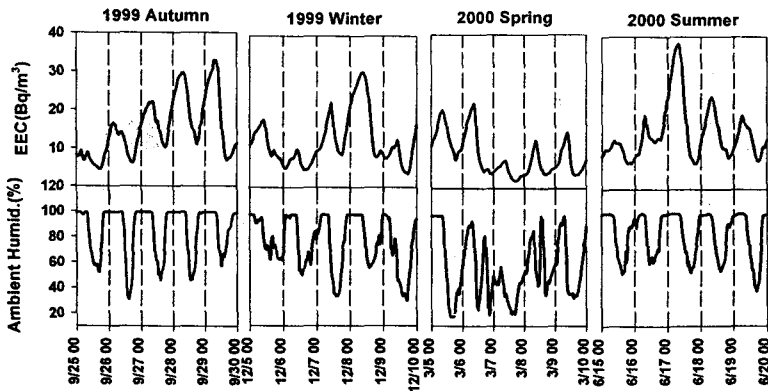


Fig. 8. Comparison of the half-hourly averaged radon progeny concentration to the ambient relative humidity.

그림 9는 1년간 동시에 측정한 풍향과 라돈자핵종 농도에 대해서 풍속을  $1\text{msec}^{-1}$ 이하,  $1\sim 3\text{msec}^{-1}$ ,  $3\sim 5\text{msec}^{-1}$ ,  $5\text{msec}^{-1}$ 이상으로 구분하여 방위와 그 농도를 나타낸 그림이다. 이 그림 (a) 처럼 풍속이  $1\text{msec}^{-1}$ 이하의 매우 고요한 날들의 경우 라돈자핵종의 농도는 풍향에 크게 관계되지 않는 것으로 나타났다. 그러나 그림 (c)나 (d)처럼 풍속이  $3\text{msec}^{-1}$ 이상 비교적 강한 바람은 대부분 이른봄철에 서북서 방향에서 불어오는 것으로서 관측되었으며, 그 때의 라돈자핵종 농도는 대부분 평균농도 이하가 됨을 볼 수 있다.

그림 10은 대기온도와 라돈자핵종 농도에 대해서 계절별로 5일씩 맑은 날을 택해서 동시에 상호 비교하여 나타낸 그림이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 대기온도가 높으면 라돈자핵종의 농도

는 낮고 반대로 대기온도가 낮으면 라돈자핵종의 농도가 높은 일일의 변동양상을 가지고 주기적으로 변하고 있음을 볼 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 일출에 따른 대기온도의 상승이 역전층을 소멸시킴으로 라돈화산이 용이해져서 대기중의 라돈 및 그 자핵종들의 농도가 낮동안에 희석되는 효과가 직접적인 영향인 것으로 판단된다.

그 외의 기상인자로서 강수량 및 대기압의 변화와 라돈자핵종 농도에 대해서 조사하였으나, 특징적인 상관성은 나타나지 않았으며, 다만 강수량과의 관계에서 단위시간당 강수량이 많아지면 대기중의 라돈자핵종의 농도는 낮아지는 경향성을 보이는 것으로 조사되었으나 신뢰도측면에서 평가하기가 곤란하였다.

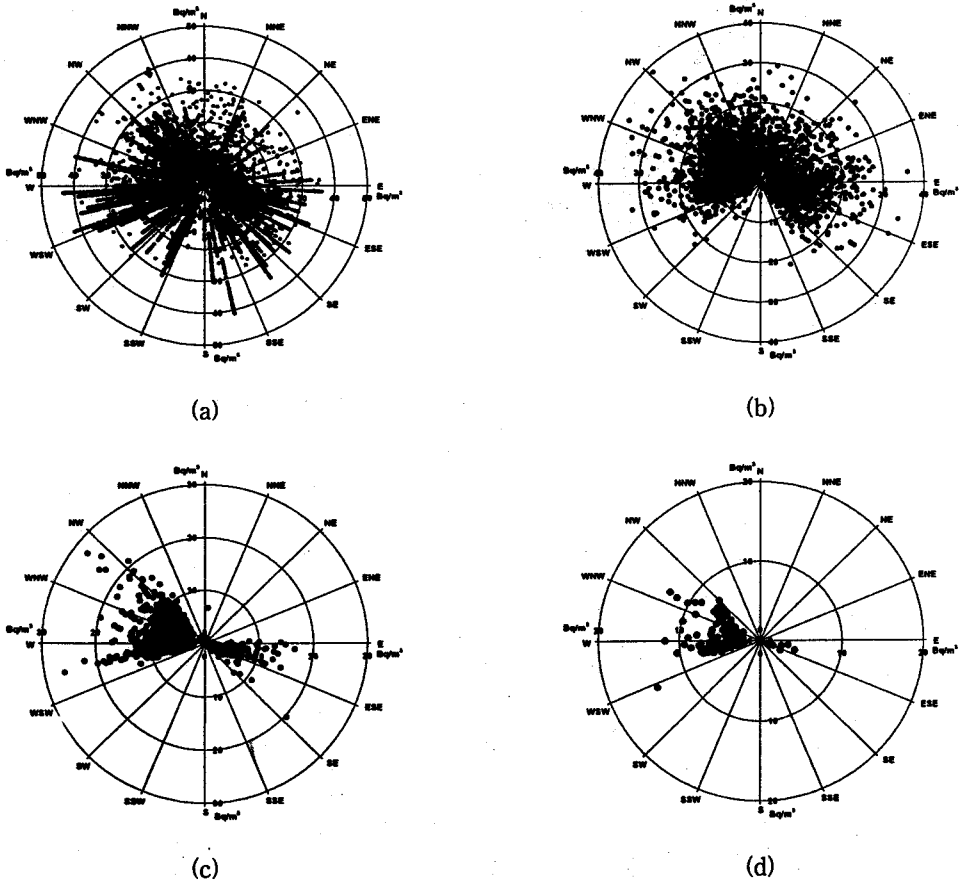


Fig. 9. Presentation of the half-hourly averaged radon progeny concentration as function of wind direction and for wind speeds in four ranges; (a) lower than  $1\text{msec}^{-1}$ , (b)  $1\sim 3\text{msec}^{-1}$ , (c)  $3\sim 5\text{msec}^{-1}$ , and higher than  $5\text{msec}^{-1}$ .



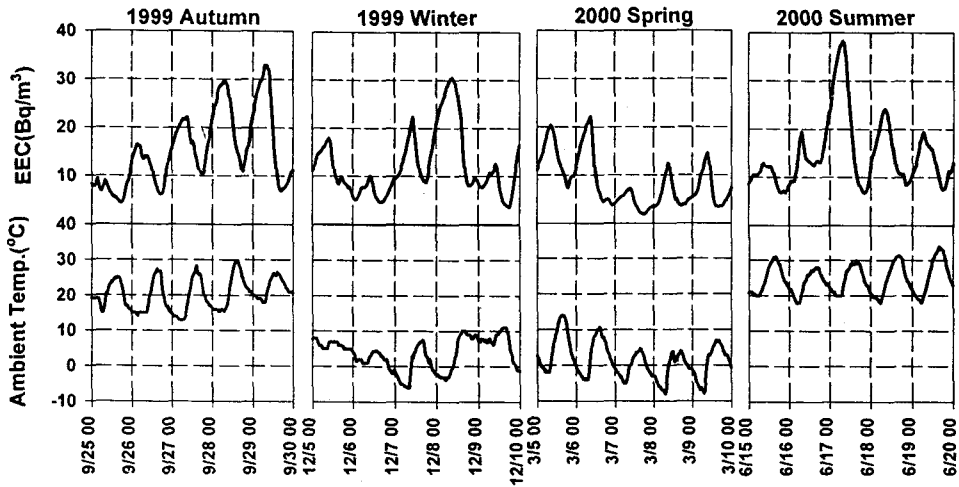


Fig. 10. Comparison of the half-hourly averaged radon progeny concentration to the ambient temperature.

### 결론

본 연구는 우리 나라 국민들의 피폭선량평가의 기초자료 확보차원에서 1년간에 걸쳐 대기중의 라돈자핵종 농도를 연속적으로 측정하고 그 결과를 기상인자와 함께 고찰하였다. 대전지역에서 대기중 라돈자핵종의 일일평균 평형등가농도( $EEC_{Rn}$ )는 산술평균  $11.8 \pm 5.86 \text{ Bq m}^{-3}$ 과 기하평균  $10.3 \pm 4.57 \text{ Bq m}^{-3}$ 정도인 것으로 나타났으며, 일일평균농도의 변동계수는 약 50% 정도였다. 매 30분마다 측정된 라돈자핵종의 평형등가농도는 최소  $0.83 \text{ Bq m}^{-3}$ 에서 최대  $43.3 \text{ Bq m}^{-3}$ 까지 하루 중 측정시간과 그때의 기상조건에 따라 변화했으나, 일일변동의 양상은 일출시점과 일몰시점에서 각각 최고농도와 최저농도를 반복하는 주기적인 모습을 보여주었다. 또한 계절적으로는 초여름이 낮고 늦가을이 높은 변동양상을 보여주었다. 이러한 일일변동의 주기적인 양상은 많은 다른 나라의 연구결과와 매우 유사하였으나, 계절적 변동특성은 우리 나라 고유의 특성을 지니고 있는 것으로 생각된다.

대기중의 라돈자핵종 농도는 측정지역의 국지적 기상특성에 크게 좌우되는 것으로 판단되며, 특히 풍속이  $6 \text{ m sec}^{-1}$  이상이 되면 평형등가농도는  $5 \text{ Bq m}^{-3}$  이하로 급격히 떨어지는 반면에 대기중의 평형등가농도가  $30 \text{ Bq m}^{-3}$  이상인 날은 풍속이  $1 \text{ m sec}^{-1}$  이하의 매우 고요한 날이었다. 또한 대기중 습도의 일일변동 양상과 평형등가농도의 양상

이 같은 주기로 반복되고 있었으며, 대기온도와는 반주기적인 반복특성을 나타내었다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관하는 원자력중장기 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

1. UNSCEAR, Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York(1996).
2. M. Wilkening, Radon in the Environment, Studies in Environmental Science 40, pp125-130, Elsevier Press, New York(1990).
3. M. Chino, H. Yamazawa, and T. Iida, "Development of an Atmospheric  $^{222}\text{Rn}$  Concentration Model using a Hydrodynamic Meteorological Model : I. One-Dimensional Practical Model", Health Phys., 70(1), 47-54 (1996).
4. M. Chino and H. Yamazawa, "Development of an Atmospheric  $^{222}\text{Rn}$  Concentration Model using a Hydrodynamic Meteorological Model : II. Three-Dimensional Research- Purpose Model", Health Phys., 70(1), 55-63(1996).
5. J. Porstendorfer, G. Butterweck, and A.

- Reineking, "Daily Variation of the Radon Concentration Indoors and Outdoors and the Influence of Meteorological Parameters", *Health Phys.*, 67(3), 283-287(1994)
6. T.B. Borak and S.A. Baynes, "Continuous Measurements of Outdoor  $^{222}\text{Rn}$  Concentrations for Three Years at one location in Colorado", *Health Phys.*, 76(4), 418-420(1999).
  7. N. Liu, H.B. Spitz, and L. Tomczak, "Statistical Analysis of Real-Time, Environmental Radon Monitoring Results at the Fernald Environmental Management Project", *Health Phys.*, 70(2), 199-206(1996).
  8. R.C.G.M. Smetsers, "An Automated Gross Alpha/Beta Activity Monitor Applied to Time-Resolved Quantitative Measurements of  $^{222}\text{Rn}$  Progeny in Air", *Health Phys.*, 68(4), 546-552(1995).
  9. 한국원자력안전기술원, 전국 환경방사능 조사 (Vol. 29), KINS/AR-409(1997).
  10. R.C.G.M. Smetsers, and R.O. Blaauboer, "Time-Resolved Monitoring of Outdoor Radiation Levels in the Netherlands", *Rad. Prot. Dosim.*, 55(3), 173-181(1994).
  11. S. Minato, "A Model for Simulating Time Variations in Natural Gamma Radiation", in: *Reports of the Government Industrial Research Institute(Japan)*, Vol. 33, No. 7, pp. 246-258(1984).
  12. UNSCEAR, *Levels and Effects of Ionizing Radiation*, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York(1966).
  13. 日本原子力安全研究協會, 環境放射線 모니터링, 실무시리즈 No.4 pp.100-109(1987).
  14. M. Wilkening, "Daily and Annual Courses of Natural Atmospheric Radioactivity", *J. Geophys. Res.*, 64(5), 521-526(1959).