

## 동북아 오염물질 장거리이동 분석을 위한 서울시 대기 중 라돈농도의 시계열적 특성에 관한 연구

김윤신<sup>†</sup> · 이철민 · 김기연 · 전형진 · 김종철 · Takao Iida\*

한양대학교 환경 및 산업의학 연구소, \*나고야대학교 핵공학부  
(2007. 2. 16. 접수/2007. 4. 20. 채택)

### Time Series Observations of Atmospheric Radon Concentration in Seoul, Korea for an Analysis of Long-Range Transportation of Air Pollutants in the North-East Asia

Yoon Shin Kim<sup>†</sup> · Cheol Min Lee · Ki Youn Kim · Hyung Jin Jeon · Jong Cheol Kim · Takao Iida\*

*Institute of Environmental and Industrial Medicine, Hanyang University*

*\*Department of Nuclear Engineering, Nagoya University*

(Received February 16, 2007/Accepted April 20, 2007)

#### ABSTRACT

Atmospheric concentrations of radon had been continuously observed in Seoul, Korea since December 1999, as a tracer for long-range transport of air pollutants from China continent to Korea. In order to study radon as a tracer of long-range transport, it is important to know information about the atmospheric distribution and variation of radon concentration and its time variation. Atmospheric radon concentration are measured with electrostatic radon monitor(ERM) at Hanyang University located in Eastern area of Seoul. Air sample is taken into a vessel of ERM, and alpha particles emitted by radon daughters  $Po^{218}$  are detected with ZnS(Ag) scintillation counter. Hourly mean concentrations and hourly alpha counts are recorded automatically. The major results obtained from time series observation of atmospheric radon were as follows : (1) The mean of airborne radon concentration in Seoul was found to be  $7.62 \pm 4.11$  Bq/m<sup>3</sup> during December 1999~January 2002. (2) The hourly variation of radon concentrations showed the highest in 8:00AM ( $8.66 \pm 4.22$  Bq/m<sup>3</sup>) and the lowest in 3:00AM ( $6.62 \pm 3.70$  Bq/m<sup>3</sup>) and 5:00AM ( $6.62 \pm 3.39$  Bq/m<sup>3</sup>). (3) the seasonal variation of radon concentrations showed higher during winter-to-fall and lower during summer-to-spring. (4) Correlation between airborne radon concentration and the meteorological factors were -0.21 for temperature, 0.09 for humidity, -0.20 for wind speed, and 0.04 for pressure. (5) The mean difference of airborne radon concentration between Asian dust ( $5.36 \pm 1.28$  Bq/m<sup>3</sup>) and non-Asian dust ( $4.95 \pm 1.49$  Bq/m<sup>3</sup>) phenomenon was significant ( $p=0.08$ ). We could identify time series distribution of radon concentration related meteorological factors. In addition, radon can be considered a good natural tracer of vertical dispersion and long-range transport.

**Keywords:** radon, long-range transport, ERM, vertical dispersion, natural tracer

#### I. 서 론

최근 NASA(National Aeronautics and Space Administration)에서 진행한 연구에서는 사하라 사막에서 발생한 먼지폭풍이 대서양을 지나서 멕시코만으로 이동해 연안에서 적조를 유발한다는 사실을 밝힌 바 있

다.<sup>1)</sup> 또한 중국에서 발생하는 황사는 인접국가인 우리나라와 일본은 물론이고 태평양을 지나 미국까지 이동하여 산업이나 경제활동에 영향을 미치고 있는 것으로 보고되고 있다.<sup>2)</sup> 한국은 중위도 편서풍 지대에 위치하여 서풍계열의 기류에 큰 영향을 받고 있으며, 따라서 중국에서 발생하는 대기오염물질의 일부는 편서풍과 함께 동진 하면서 한반도와 그 주위를 지나 침전할 수 있다.<sup>3)</sup>

대기오염물질의 장거리 이동에 관한 연구는 자연적으로 발생하는 오염물질과 인위적으로 발생하는 오염물

<sup>†</sup>Corresponding author : Institute of Environmental and Industrial Medicine, Hanyang University  
Tel: 82-2-2220-1510, Fax: 82-2-2299-3915  
E-mail : yoonshin@hanyang.ac.kr

질을 추적할 수 있다. 자연적으로 발생하는 오염물질인 황사의 발생, 이동 및 침전 등이 있고 인위적으로 발생하는 오염물질로는 입자상물질, Sulphate의 연구사례가 있다.<sup>9)</sup> 그러나 중국에서 발생한 대기오염물질은 서해를 넘어 이동하면서 화학적 성분이 변화하기 때문에 대기오염물질의 장거리 이동을 명확하게 설명할 수 없는 한계를 가지고 있다. 이에 반해 라돈은 다른 물질과 화학적으로 결합 또는 부착하지 않는 불활성기체이고 상대적으로 3.82일의 긴 반감기를 갖고 있기 때문에 충분한 시간 동안 공기 중에 머물러 있어 대기확산에 의한 대륙기원물질의 장거리 이동을 연구하는데 있어서 유용한 추적물질 중의 하나로 알려져 있다.<sup>4,5)</sup> 이미 라돈의 대기중 거동 특성에 관한 연구는 많은 학자들에 의해 수행되어져 오고 있으며,<sup>6-8)</sup> 대기 이동에 관한 수치모델의 정확도 평가를 위해 대기 중 라돈농도의 관측치와의 비교를 통해 모델의 정확도를 평가하기도 하였다.<sup>9)</sup> 그러나 대부분의 연구가 적분형 라돈검출기를 이용하여 얻어진 장기간 누적라돈농도 또는 단기간 연속측정을 통해 얻어진 라돈농도를 이용하고 있어 대기 중 라돈농도의 분포 및 변화에 관한 정확한 해석에 있어서 많은 한계를 가지고 있다. 또한 라돈에 관한 국내 연구는 주로 실내 농도 현장 조사에 치중하여<sup>10-12)</sup> 발생원 규명을 위해서 대기 중 라돈의 이동 경로 및 분포 특성 자료가 절실히 요구되는 바이다.

이에 본 연구에서는 서울에 위치한 한양대학교 캠퍼스 내에서 2년동안 연속적으로 대기중 시간별 라돈농도를 관측한 결과를 바탕으로 대기중 라돈의 분포특성을 파악하기 위한 분석의 일환으로 라돈의 시계열적 분포 특성 및 기상인자와의 관계를 분석하였으며, 또한 동북아시아 지역의 대기오염물질의 장거리 이동경로 분석의 일환으로 황사기간과 그 외 기간의 대기 중 라돈농도분포 특성간의 통계적 분석 결과를 제시함으로써 향후 동북아 오염물질의 장거리 이동에 관한 연구에 있어 라돈의 이용가능성을 제시하는 것을 목적으로 하였다.

## II. 연구방법

### 1. 연구기간 및 관측장소

서울시 동쪽 성동구에 위치하고 있는 한양대학교 서울캠퍼스 내에 관측소(북위 37°31'~37°34', 동경 127°00'~127°04')를 설치하고 1999년 12월부터 2002년 1월까지 26개월에 걸쳐 일일 시간별로 연속적으로 대기 중 라돈농도를 관측하였다. Fig. 1은 관측소가 설치된 지점을 나타낸 것이다.

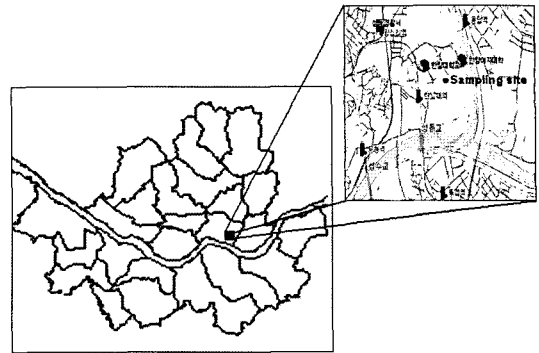


Fig. 1. Map of <sup>222</sup>Rn sampling site in Seoul, Korea.

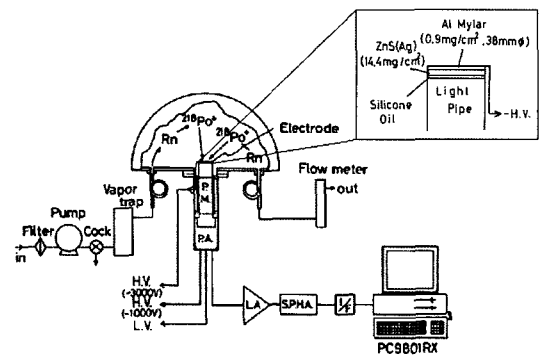


Fig. 2. Schematic diagram of Electrostatic Radon Monitor (ERM).

### 2. 관측장비

대기 중 라돈의 시계열적 분포 특성 및 장거리 이동 경로를 파악하는데 있어 가장 중요시 되는 것은 대기 중 라돈농도변화를 장기간에 걸친 연속적 측정이 이루어져야 하며, 낮은 대기 중 라돈농도까지 정확하게 관측할 수 있어야 한다. 또한 관측기의 유지가 용이하고 안정적이어야 한다. 본 연구에서는 이와 같은 특성을 수용할 수 있는 관측기로 사료되는 일본 나고야 대학의 Iida 등<sup>13)</sup>에 의해 개발되었으며 관측기의 성능 평가에 관한 수 편의 논문이 기존에 발표되어 있는 Electrostatic Radon Monitor(이하 ERM이라 함)를 이용하였다.<sup>5,9,14)</sup>

Fig. 2는 ERM의 개략적인 도식을 나타낸 것으로 라돈 검출 구성부는 반경 200 mm의 알루미늄 반구의 중앙에 위치하였으며, 이 모니터의 부피는 약 16.8 l이다. 관측기내로 유입되는 공기 중의 에어로졸과 입자상태의 라돈자핵종 및 수분을 제거하기 위해 membrane filter와 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(phosphorus pentoxide) 건습제가 들어 있는 vapor trap를 통해 외부 공기가 1 l/min으로 유입되도록 설계되어져 있다. ERM의 대기 중 라돈의 관측원

**Table 1.** Specification of Electrostatic Radon Monitor(ERM)

Specification of ERM	
Measurement form	Continuous
Principle	Scintillation counter
Sampling time	1 hour
Detection limit	0.3 Bq/m <sup>3</sup>
Flow rate	1 l/min

리는 라돈의 α 방사붕괴 과정에서 생성되는 라돈자핵 종인 <sup>218</sup>Po 원자들은 양전하를 띠게 되므로 이러한 양전하의 <sup>218</sup>Po 이온을 10 mg/cm<sup>2</sup>의 ZnS(Ag)로 코팅되어 있는 Al Mylar(0.9 mg/cm<sup>2</sup>)의 전극에 정전기적(3,000 V)으로 포집한다. 포집된 <sup>218</sup>Po가 방사붕괴시 방출하는 α 입자들은 ZnS(Ag)로 코팅된 Al Mylar를 투과하면서 섬광을 발생시키며 이때 발생된 섬광은 직경 38 mm의 광전증폭관(photomultiplier tube)에 의해서 검출·증폭되어 인터페이스(interface)를 통해 관측기와 연결된 컴퓨터(NEC PC-98011RX)에 전달된다. 컴퓨터에서는 다음의 식을 이용하여 매 1시간마다 측정된 α 입자의 계수에 의해서 자동적으로 라돈농도를 계산하여 매일 오전 0시에 자동으로 시간별 대기중 라돈농도를 저장한다. Table 1은 본 연구에서 이용한 ERM의 물리적 특성을 나타낸 것이다.

$$Q(I) = C(I) - \sum_{i=1}^5 \frac{C'(I-i)}{CF \times F(I)}$$

- 여기서  $Q(I)$  : 시간간격  $I$  동안의 평균라돈농도(Bq/m<sup>3</sup>)
- $C(I)$  : 시간간격  $I$  동안 발생한 알파입자의 수
- $C'(I-i)$  : 시간간격  $I-i$  동안 라돈자핵종이 전극에 포집 되어지리라 기대되는 α 입자의 수
- $CF$  : 포집효율 및 전압에 의해 주어진 교정상수
- $F(I)$  : 라돈자핵종의 붕괴율로 <sup>218</sup>Po에 대한 전극의 포집효율 및 알파입자의 계수 시간에 대한 함수값에 의해 주어진 교정상수

**3. 자료분석**

대기 중 라돈농도의 시계열적 분포 특성을 파악하기 위해 전체 연구기간동안의 대기중 라돈농도의 일 평균 라돈농도 자료를 이용하여 시간의 함수로 농도 분포를 제시하였으며, 라돈의 단주기적 분포경향을 파악하기 위해 일일 시간별 농도분포 및 계절에 따른 일일 시간별 농도분포를 구분하여 제시하였다. 또한 대기 중 라

돈농도의 계절별 차이를 파악하기 위해 계절별 라돈농도분포를 제시하였다.

대기 중 오염물질의 농도 변화에 영향을 줄 수 있는 여러 가지 요인 중에서 발생원을 제외하고 가장 큰 영향을 주는 요소로는 기상인자로 알려져 있다.<sup>15)</sup> 이에 본 연구에서는 대기 중 라돈농도와 기상인자와의 관련성을 조사하기 위해 라돈농도와 기상인자 즉, 기온, 습도, 풍속, 기압과의 상관관계를 조사하였으며, 또한 각 기상인자별로 구간을 나누고 이들 구간간의 라돈농도의 차이를 일원분산분석(One way ANOVA)를 통해 검정하였다.

동북아시아 지역의 대기오염물질의 장거리 이동경로 파악에 있어 라돈의 활용 가능성을 제시하기 위해 황사기간과 그 외 기간간의 라돈농도의 차이를 검정하였으며, 또한 본 연구에 이용된 라돈관측장비와 동일한 ERM을 이용하여 중국의 Beijing, Fuzhuo 및 일본의 Nagoya, Kanazawa에서 선행된 대기 중 라돈농도 조사 연구결과와 본 연구결과와의 비교 결과를 제시하였다.

황사일과 비황사일간의 대기 중 라돈농도의 차이 검정을 위하여 연구기간을 2000년 3월, 4월과 2001년 3월과 4월의 황사일과 비황사일로 구분한 후 이들 기간의 라돈농도 차이를 t-검정을 이용하여 비교하였다. 연구조사기간을 2000년과 2001년 3월과 4월로 제한한 이유는 첫째, 여러 선행연구에서 과거 국내 황사 다발기간으로 3월부터 5월까지로 선정하고 있으며,<sup>16-18)</sup> 둘째, 대기 중 라돈농도의 시계열적 특성 중 계절적 변동에 따른 혼란요소를 제거하기 위하여 3월부터 5월 즉 봄철기간으로 연구기간을 제한하였으며, 셋째, 2000년 5월과 2001년 5월에 황사가 발생하지 않아 5월 또한 본 연구 범위에서 제외하였다. t-검정은 비교대상이 되는 두 그룹간의 차이를 검정하는 방법으로 비교하는 그룹의 모집단이 정규분포임을 가정한다. 그러나 대기 중의 오염물질의 농도분포는 정규분포를 띠지 않는 경우가 많기 때문에 이 가정을 확인하지 않고 검정한 결과는 잘못된 해석을 하게 될 수 있다.<sup>19)</sup> 이에 본 연구에서는 황사일과 비황사일의 라돈농도 분포특성을 적합도 검정(goodness-of-fit test)을 실시하여 검정한 후 Log 변환을 통한 정규분포화하여 두 그룹간의 농도 차를 검정하였다.

**III. 연구결과**

**1. 전체 관측 결과**

Fig. 3은 전체 연구기간동안 관측된 대기 중 라돈농도 자료의 분포 특성을 파악하기 위해 일 평균라돈농

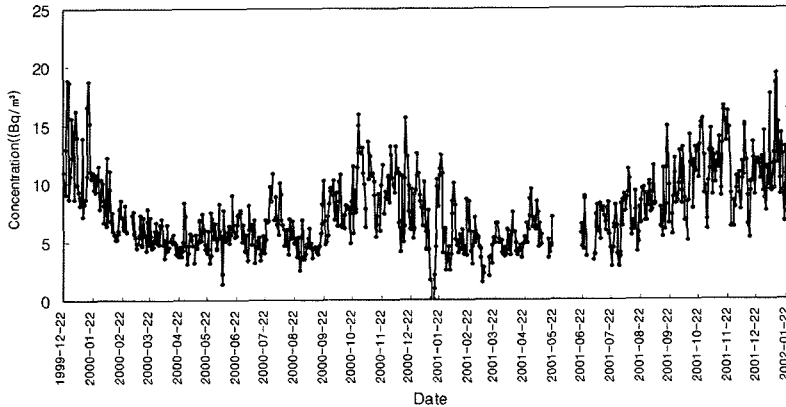


Fig. 3. Daily variation of airborne radon in Seoul, Korea during December 1999~January 2002.

Table 2. A statistical summary of radon concentration and meteorological factors during the whole study period

	N <sup>a)</sup>	Mean	S.D. <sup>b)</sup>	Max <sup>c)</sup>	Min <sup>d)</sup>
Radon (Bq/m <sup>3</sup> )	16733	7.62	4.11	33.20	0.00
Temperature (°C)	18528	12.03	11.17	35.10	-18.40
Humidity (%)	18528	61.92	18.34	99.00	9.00
Wind speed (m/s)	18528	2.10	1.47	11.20	0.00
Pressure (hPa)	6176	1006.02	8.01	1028.80	979.00

a) Number of samples, b) Standard deviation, c) Maximum value, d) Minimum value

도 자료를 이용하여 시간의 함수로 농도분포를 제시한 것으로 전원 공급상의 문제로 인해 2001년 5월 22일부터 6월 19일까지 약 1달여간 및 간헐적인 관측기 정비를 위한 기간을 제외하고는 지속적으로 관측된 결과를 제시하였으며, Table 2은 전체 연구기간동안 관측된 라돈자료 및 동 기간동안 기상청에서 관측된 서울시 기상자료를 이용하여 계산한 통계량을 제시한 것이다. 연구 기간동안 관측된 16,733개의 시간별 라돈농도 관측 자료에 대한 평균은  $7.62 \pm 4.11$  Bq/m<sup>3</sup>의 수준을 유지하였다. 또한 전체 연구기간 중 기온은 평균  $12.03 \pm 11.17^\circ\text{C}$ 를 유지하였고, 습도는  $61.92 \pm 18.34\%$ , 풍속은  $2.10 \pm 1.47$  m/s, 기압은  $1006.02 \pm 8.01$  hpa를 기록하였다.

2. 라돈의 일주기 및 계절 주기적 농도분포 특성

대기 중 라돈의 단주기적 분포경향을 파악하기 위해 전체 관측자료를 일일 시간별 농도분포 및 계절에 따른 일일 시간별 농도분포로 구분하여 Fig. 4와 같은 결과를 산출하였다. 일일 시간별 라돈농도분포는 오전 8시를 전후하여 가장 높은 농도( $8.66 \pm 4.22$  Bq/m<sup>3</sup>)를 나타냈으며, 오후 3시( $6.62 \pm 3.70$  Bq/m<sup>3</sup>)와 오후 5시( $6.62 \pm 3.39$  Bq/m<sup>3</sup>)를 전후하여 가장 낮은 농도를 나타냈다. 또한 일일 시간별 라돈농도분포를 계절별로 분리해서

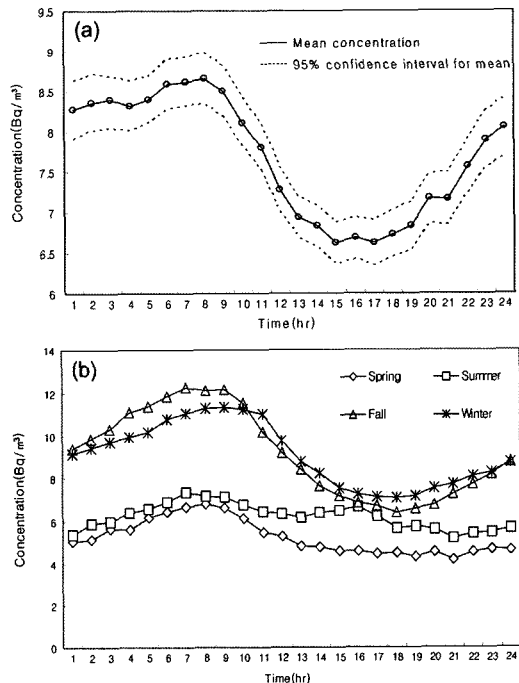


Fig. 4. Hourly variation of radon concentration during December 1999~January 2002: (a) all data sets, (b) seasonally divided data sets.

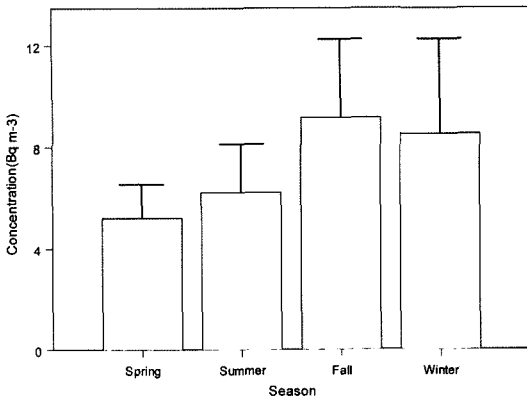


Fig. 5. Seasonal variation of radon concentration in Seoul, Korea: Error bars in the upper figure denote one standard deviation.

보면 봄, 가을, 겨울철의 일일 시간별 라돈농도분포는 전체 일일 시간별 라돈농도분포와 같이 야간의 라돈농도가 낮의 라돈농도보다 높은 분포를 보였다. 그러나 여름철 일일 시간별 라돈농도분포는 이른 아침과 늦은 오후에 높은 농도를 나타내는 쌍극분포를 하고 있는 것으로 조사되었다.

Fig. 5는 총 연구기간 동안의 계절별 평균라돈농도와 표준편차를 나타낸 것으로 봄, 여름, 가을, 겨울의 평균 라돈농도는 각각  $5.23 \pm 1.32 \text{ Bq/m}^3$ ,  $6.21 \pm 1.91 \text{ Bq/m}^3$ ,  $9.16 \pm 3.09 \text{ Bq/m}^3$ ,  $8.52 \pm 3.74 \text{ Bq/m}^3$ 로 계절에 따른 라돈농도는 가을, 겨울, 여름, 봄의 순으로 가을이 가장 높고 봄이 가장 낮은 농도분포를 나타냈다.

### 3. 라돈의 기상학적 농도분포 특성

Table 3와 Fig. 6은 연구기간동안의 서울의 기온, 습도, 풍속, 기압의 월평균 및 계절별 분포를 나타낸 것이다. 계절별 평균 기온의 경우 여름, 가을, 봄, 겨울의 순으로 각각  $23.9 \pm 2.5^\circ\text{C}$ ,  $13.4 \pm 6.6^\circ\text{C}$ ,  $10.6 \pm 6.0^\circ\text{C}$ ,  $-1.7 \pm 4.7^\circ\text{C}$ 로 전체  $12.0 \pm 11.2^\circ\text{C}$ 의 평균기온을 나타냈으며, 계절별 평균 습도는 여름, 가을, 겨울, 봄의 순으로 각각  $74.5 \pm 11.7\%$ ,  $61.8 \pm 12.4\%$ ,  $60.5 \pm 14.1\%$ ,  $58.7 \pm 14.1\%$ 로 전체  $62.0 \pm 18.3\%$ 를 나타냈다. 계절별 평균 풍속은 봄, 겨울, 여름, 가을의 순으로 각각  $2.2 \pm 1.4 \text{ m/s}$ ,  $1.9 \pm 1.2 \text{ m/s}$ ,  $1.4 \pm 1.2 \text{ m/s}$ ,  $1.2 \pm 1.0 \text{ m/s}$ 로 전체 평균 풍속은  $2.1 \pm 1.5 \text{ m/s}$ 로 조사되었으며, 계절별 평균 기압은 겨울, 가을, 봄, 여름의 순으로 각각  $1013.4 \pm 5.2 \text{ hpa}$ ,  $1008.4 \pm 5.8 \text{ hpa}$ ,  $1003.2 \pm 5.2 \text{ hpa}$ ,  $997.6 \pm 4.0 \text{ hpa}$ 로 전체 평균 기압은  $1006.0 \pm 8.0 \text{ hpa}$ 로 조사되어 관측기간동안의 서울의 기상조건은 여름과 가을이 봄과 겨울에 비해 기온 및 습도가 다소 높은 반

Table 3. Summary of meteorological conditions in Seoul, Korea during December 1999~January 2002

Year	Month	Temperature (°C)	Humidity (%)	Wind speed (m/s)	Pressure (hpa)	
1999	December	-0.8	71.7	1.3	1013.4	
	January	-2.9	67.0	2.3	1015.2	
	February	-2.6	61.0	2.5	1012.1	
	March	4.9	57.5	2.6	1007.0	
	April	10.2	60.9	2.3	1002.2	
	May	15.6	72.0	2.0	999.9	
	2000	June	21.8	71.3	1.7	997.2
		July	25.4	78.3	1.6	995.7
		August	25.1	82.4	1.7	998.7
		September	19.4	69.7	1.3	1002.7
		October	13.6	63.3	0.9	1009.2
		November	5.8	56.0	1.4	1014.0
December		0.5	57.0	1.8	1013.5	
2002		January	-4.6	62.0	2.0	1012.9
		February	-1.0	60.1	1.6	1013.3
		March	3.8	51.3	2.4	1004.8
		April	12.0	49.6	2.0	1005.1
		May	17.1	60.4	2.0	1000.2
	June	21.1	69.9	1.2	997.2	
	July	24.9	75.6	1.1	997.1	
	August	25.0	69.0	0.8	999.7	
	September	20.7	58.1	1.0	1004.4	
	October	15.2	65.3	1.0	1008.2	
	November	5.7	58.4	1.5	1011.5	
	December	-1.3	49.0	2.0	1016.7	
2003	January	-0.2	63.2	1.8	1010.3	

면 풍속과 기압은 봄과 겨울철에 증가하는 것으로 조사되었다.

Fig. 7은 대기 중 라돈농도와 기상인자와의 상관분석 결과를 나타낸 것으로 대기 중 라돈농도는 기온, 습도, 기류, 기압과의 상관계수가 각각  $-0.21$ ,  $-0.09$ ,  $-0.20$ ,  $0.41$ 로 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의한 결과를 나타냈다. 이는 대기 중의 라돈농도와 기상인자와의 상관계수는 낮으나 이들 기상인자에 영향을 받고 있음을 시사하는 결과라 할 수 있다.

이들 기상인자와 라돈농도와의 관계를 더 자세히 조사하기 위해 각 기상인자별로 구간을 나누고 이들 구간간의 라돈농도의 차이를 일원분산분석(one way ANOVA)을 통해 검정하여 Table 4와 같은 결과를 도출하였다. 대기 중 라돈농도는 기온이  $10^\circ\text{C}$  이하 일 때가  $20^\circ\text{C}$  이상에서보다 높게 조사되었으며, 이 두 집단의 라돈농도간에 유의한 차이가 있는 것으로 조사되

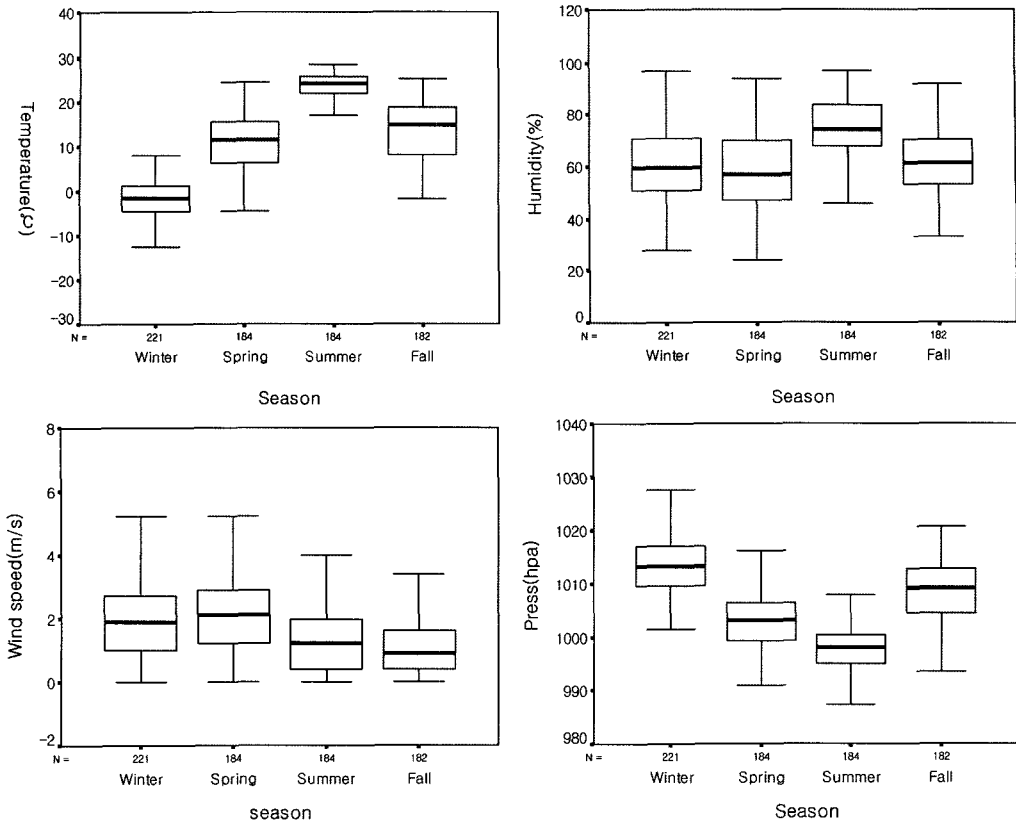


Fig. 6. Seasonal variation of meteorological factors in Seoul during December 1999~January 2002.

Radon (Bq/m <sup>3</sup> )				
$r = -0.21$ ( $p < 0.01$ )	Temperature (°C)			
$r = -0.09$ ( $p < 0.05$ )	$r = 0.38$ ( $p < 0.01$ )	Humidity (%)		
$r = -0.20$ ( $p < 0.01$ )	$r = -0.25$ ( $p < 0.01$ )	$r = 0.03$ ( $p > 0.05$ )	Wind Speed (m/s)	
$r = 0.41$ ( $p < 0.01$ )	$r = -0.74$ ( $p < 0.01$ )	$r = -0.45$ ( $p < 0.01$ )	$r = 0.05$ ( $p > 0.05$ )	Press (hpa)

Fig. 7. Comparison between radon concentration and meteorological factors.

었다( $p < 0.01$ ). 습도와 라돈농도와의 관계는 습도 80%까지는 라돈농도가 증가하는 것으로 조사되었으나 이

들 집단 간의 라돈농도간에는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았으며, 습도가 80%를 초과 시에 대기 중 라돈농도가 감소하는 결과를 나타냈다. 습도 80%를 기준으로 80% 이하시의 대기 중 라돈농도와 80% 초과시의 대기 중 라돈농도간에는 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 조사되었다( $p < 0.01$ ). 풍속과 라돈농도와의 관계는 풍속이 증가할수록 라돈농도가 감소하는 경향을 나타냈으며, 풍속이 1.0 m/s 이하의 대기 중 라돈농도와 2.1 m/s 이상의 대기 중 라돈농도간에 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 조사되었다( $p < 0.01$ ). 기압과 라돈농도간의 관계는 기압이 증가함에 따라 라돈농도가 증가하는 결과를 나타냈으며, 1010 hpa 이하의 라돈농도와 1010 hpa 초과시의 라돈농도간에 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 조사되었다( $p < 0.01$ ).

4. 황사기간 중 라돈농도의 분포 특성

Table 5는 1998년부터 2002년까지 5년 동안 3월부터 5월 사이에 서울에서 관측된 황사 일수를 나타낸 것으로 이 기간 동안 관측된 황사 일수는 총 60일이다. 이 밖에 1999년에는 1월 25일부터 28일까지, 2001년에

**Table 4.** The result from one way ANOVA test between radon concentration and meteorological in Seoul

Meteorological factor	N	Classes	Mean (Bq/m <sup>3</sup> )	S.D.	T <sup>a)</sup>	p-value
Temperature (°C)	151	≤0	8.17	3.36	a	<0.01
	203	0.1~10.0	8.44	3.84	a	
	178	10.1~20.0	7.25	3.01	b	
	180	20.1≤	6.41	2.01	b	
Humidity (%)	44	≤40.0	7.25	2.72	a, b	<0.01
	260	40.1~60.0	7.81	3.29	a	
	290	60.1~80.0	7.91	3.35	a	
	118	80.1≤	6.36	2.74	b	
Wind speed (m/s)	266	≤1.0	8.23	3.32	a	<0.01
	196	1.1~2.0	7.53	3.11	a, b	
	156	2.1~3.0	7.05	3.16	b	
	94	3.1≤	6.68	3.05	b	
Press (hpa)	162	≤1000.0	5.85	1.74	a	<0.01
	296	1000.1~1010.0	7.01	2.89	a	
	219	1010.1~1020	9.38	3.61	b	
	35	1030≤	9.16	3.23	b	

a) The same letters indicate non-significant difference between groups based on Tukey's multiple comparison test.

**Table 5.** Frequencies of asian dust phenomenon during 1998~2002

Year	Month				Occurrence days of Asian dust
	March	April	May	Total	
1998	3	10	-	13	3/28, 29, 30 4/14, 15, 16, 17, 18 4/19, 20, 21, 22, 28
1999	-	1	-	1	4/5
2000	5	5	-	10	3/7, 23, 24, 27, 28 4/7, 8, 23, 26, 27
2001	11	9	4	24	3/3, 4, 5, 6, 7 3/20, 21, 22, 23, 24, 25 4/7, 8, 9, 10, 11, 12 4/24, 25, 26 5/
2002	5	6	-	12	3/17, 18, 19, 21, 23 4/ 8, 9, 10, 12, 16, 17
Total(%)	25(41.7)	31(51.7)	4(6.6)	60(100.0)	

**Table 6.** Types of statistical distribution of radon concentration during Asian Dust and non-Asian Dust phenomenon

	Type of distribution	Parameter (Bq/m <sup>3</sup> )	Goodness-of-fit test			
			χ <sup>2</sup>	p-value	Kolmogorov-Smirnov	Anderson-Darling
Asian dust (N <sup>a)</sup> =29)	Gamma	3.31 <sup>b)</sup> , 0.95 <sup>c)</sup> , 2.16 <sup>d)</sup>	2.24	0.33	0.10	0.41
	Beta	11.27 <sup>e)</sup> , 21.97 <sup>f)</sup> , 15.82 <sup>g)</sup>	2.24	0.33	0.12	0.53
	Weibull	3.29 <sup>b)</sup> , 2.33 <sup>c)</sup> , 1.67 <sup>d)</sup>	2.24	0.33	0.10	0.36
Non-Asian dust (N <sup>a)</sup> =59)	Logical	4.88 <sup>b)</sup> , 0.81 <sup>c)</sup>	7.00	0.43	0.08	0.37
	Gamma	0.00, 0.47, 10.47	10.00	0.12	0.09	0.59
	Beta	7.92, 22.80, 19.15	12.00	0.06	0.09	0.56

a) Number of samples, b) Location, c) Scale, d) Shape, e) Alpha, f) Beta, g) Scale, h) Mean.

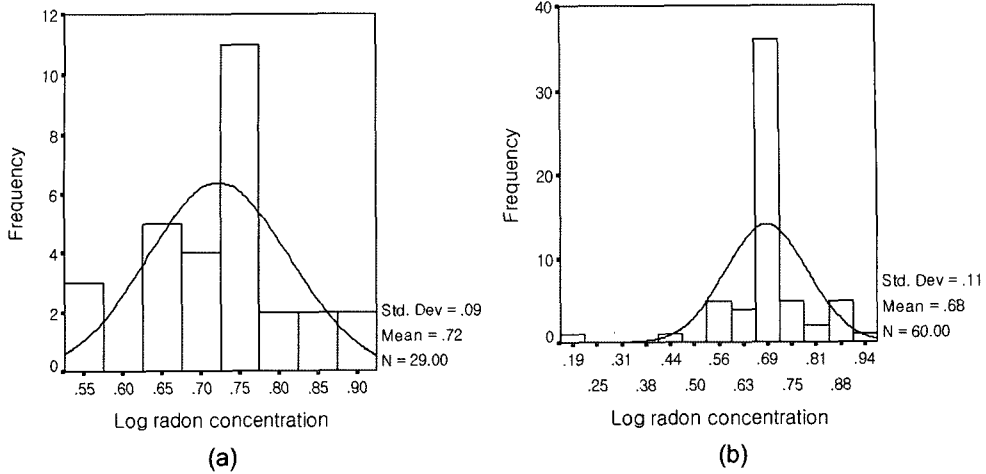


Fig. 8. Histogram of log radon concentrations: (a) Asian dust, (b) non-Asian dust.

Table 7. Comparison of radon concentrations during Asian Dust and non-Asian Dust phenomenon

	N	Mean (Bq/m <sup>3</sup> )	S.D.	p-value
Asian Dust	29	5.36	1.28	0.08
Non-Asian Dust	60	4.95	1.49	0.08

는 1월 2일과 12월 13일부터 14일까지 황사가 발생한 것으로 조사되었다.

Table 6은 황사일과 비황사일의 대기 중 라돈농도의 분포의 결과치를 나타낸 것이다. 황사일과 비황사일의 라돈농도 분포특성을 적합도 검정(goodness-of-fit test)한 결과 황사일의 경우 Gamma 분포(p=0.33), Beta 분포(p=0.33), Weibull 분포(p=0.33)하는 것으로 조사되었으며, 비황사일의 경우는 Logical 분포(p=0.43), Gamma 분포(p=0.12), Beta 분포(p=0.06)하는 것으로 조사되어 황사일 및 비황사일의 대기 중 라돈농도의 분포는 Gamma, Beta 및 Weibull 분포와 같이 꼬리가 오른쪽으로 치우친 비대칭분포를 하고 있는 것으로 조사되었다. 이에 두 비정규분포형태의 자료를 정규분포화 시키기 위해 Log 변환을 각각 실시하면 Fig. 8처럼 정규분포화 된다. 이 정규분포화 된 자료를 바탕으로 t-검정을 실시한 결과 Table 7과 같이 두 집단 간에 유의수준 0.1에서 유의한 차이(p=0.08)를 보여 대기 중 라돈농도는 황사기간이 비황사기간에 비해 높은 것으로 조사되었다. 이는 라돈의 주발생원이 토양으로 황사 발생시 중국에서 발생한 모래먼지로부터 방출된 라돈 농도가 서울 대기중의 라돈농도에 영향을 미친 것으로 사료된다.

#### IV. 고 찰

본 연구에서 조사된 일일 시간별 대기 중 라돈농도분포는 오전 8시를 전후로 가장 높았으며, 오후 3시와 5시를 전후하여 가장 낮은 농도를 나타냈다. 이러한 일일 시간별 라돈농도분포 결과는 Italy의 Milan에서 1997년 1월부터 2000년 12월까지 4년 동안 Sesana 등<sup>20)</sup>에 의해 조사된 연구결과와 유사한 결과로 야간의 대기 중 라돈농도의 증가는 지표면 가까이에 기온역전층의 형성으로 인한 혼합고의 높이가 낮아짐에 따른 결과로 사료되며 또한 오후의 대기 중 라돈농도의 감소는 이른 아침 태양이 뜨면 지표면의 온도가 상승하여 기온역전층이 붕괴됨으로써 높은 고도에 새로운 혼합고가 형성됨으로써 결과적으로 대기중의 라돈농도가 낮아지게 되고 혼합고가 최대가 되는 늦은 오후 대기중의 라돈농도가 최소값에 도달하게 되는 것으로 사료된다.

일일 시간별 라돈농도분포를 계절별로 분리하여 분석한 결과에서 여름철의 경우 일일 시간별 라돈농도분포와 동일한 결과를 나타낸 봄, 가을, 겨울철의 분포와는 달리 이른 아침과 늦은 오후에 높은 농도를 나타내는 쌍극분포를 나타냈다. 이는 여름철 낮에 고기압 중심부에서 공기가 주위로 흘러 나와 상공의 공기가 내려오면서 단일 압축되어 하층부의 공기보다 온도가 높은 층, 기온역전층의 형성으로 인해 하층부 혼합층의 고도가 낮아지게 됨에 따라 대기 중 라돈농도의 축적이 증가됨으로써 오후 시간대의 라돈농도가 다른 계절과는 달리 증가하는 경향을 나타낸 것으로 사료된다.

대기 중 라돈농도의 계절적 분포는 가을-겨울이 봄-



여름에 비해 상대적으로 높은 농도분포를 유지하는 결과를 나타냈다. 이는 Zhuo 등<sup>21)</sup>에 의해 적분형 라돈검출기를 이용해 우리나라에서 선행된 연구결과와 실외 라돈농도와 계절적 분포가 유사한 결과를 나타냈으며, 또한 Sesana 등<sup>20)</sup>에 의해 Italy의 Milan에서 조사된 실외 라돈농도의 계절분포와 유사한 결과로 그들은 라돈의 계절적 분포가 가을과 겨울이 봄과 여름보다 높은 이유로 대기 혼합고의 높이의 차이로 인한 결과로 제시하고 있다. 즉, 가을 및 겨울의 대기 혼합고는 높이가 낮아지는 반면 봄과 여름의 대기 혼합고의 높이는 점차 높아짐으로써 대기 중의 계절별 라돈농도는 혼합고의 높이에 반비례하여 겨울과 가을이 높은 농도를 유지하고 봄과 여름이 낮은 농도를 유지하게 된다고 제시하고 있다.

대기 중 라돈농도의 일일 시간별 분포 및 계절별 분포 결과를 통해 대기 중의 라돈농도는 혼합고의 높이에 영향을 받고 있는 것으로 조사되었으며, 이러한 대기 중 라돈농도분포 특성은 라돈을 이용한 대기의 수직 확산을 살피는데 있어 매우 유용하다고 사료된다. 즉 라돈은 대기의 수직확산을 살피는데 있어 좋은 자연적 tracer라 사료된다.

대기 중 라돈농도와 기상인자와의 상관분석 및 일원 분산분석 결과를 통해 대기 중의 라돈농도는 기온이 하강 할수록 증가하는 것으로 조사되었으며, 습도와 라돈농도와의 관계는 습도 80% 이하에서는 습도에 비례하여 라돈농도가 증가하고 습도가 80% 초과시 라돈농도가 감소하는 결과를 나타내 강수와 같은 영향 등에 의해 대기 중 수분함량이 매우 높아지는 경우 라돈농도가 감소하는 것으로 사료된다. 또한 라돈농도와 풍속과의 관계는 풍속이 증가함에 따라 라돈농도가 감소하는 결과를 나타내 풍속이 증가함에 따라 활발한 대기 확산 운동 증가로 인한 대기 중 라돈농도 희석의 증가에 의한 영향으로 사료된다.

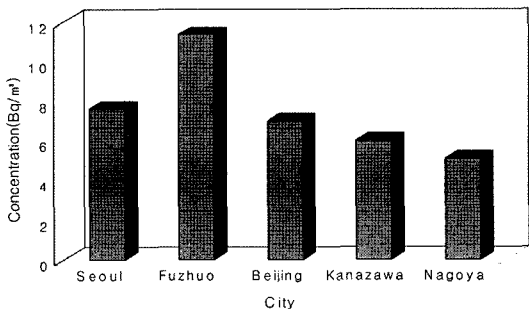


Fig. 9. Comparison of radon concentration measured in Seoul, Fuzhuo, Beijing, Kanazawa, and Nagoya.

Fig. 9는 본 연구의 관측결과와 중국 Beijing과 Fuzhuo 및 일본의 Nagoya와 Kanazawa의 대기 중 라돈농도 조사 선행 연구 결과<sup>9)</sup>와 비교한 것으로 중국의 Beijing과 Fuzhuo의 대기 중 평균 라돈은 각각 7.0 Bq/m<sup>3</sup>, 11.4 Bq/m<sup>3</sup>로 Beijing의 경우 본 연구 결과와 유사한 농도를 나타냈으나 Fuzhuo의 경우 본 연구결과에 비해 약 1.5배 높은 것으로 조사되었으며, 일본의 Nagoya와 Kanazawa의 대기 중 평균라돈농도는 각각 5.1 Bq/m<sup>3</sup>, 6.0 Bq/m<sup>3</sup>으로 본 연구 결과에 비해 약 1.2~1.5배 낮은 평균라돈농도를 나타냈다. 라돈의 주 발생원이 토양임을 고려하면 중국의 내륙지방인 Fuzhuo의 경우 반도국가인 우리나라의 서울 및 섬나라인 일본의 Nagoya와 Kanazawa에 비해 대기 중 라돈농도가 높은 것으로 사료되며, 또한 항구도시인 Nagoya의 경우 다른 도시에 비해 토양에서 발생하는 라돈의 양이 적고 주변 대기환경의 영향이 적어 대기 중 라돈농도가 가장 낮게 나타난 것으로 사료된다. 또한 Beijing의 경우 Fuzhuo 보다 낮은 라돈농도를 나타낸 것은 국지적 지형의 영향 즉 베이징의 경우 분지를 3면으로 둘러싸고 있는 산지의 영향으로 중국 타 지역에 비해 연강수량이 높아 대기 중 라돈농도가 낮게 조사된 것으로 사료된다. 이 결과는 중국, 우리나라 및 일본의 대기환경 중 라돈농도는 중국, 우리나라, 일본 순으로 높은 농도분포를 나타내고 있음을 나타내는 결과로 황사일의 대기중 라돈농도가 비황사일의 대기 중 라돈농도에 비해 높은 결과를 나타낸 본 연구결과와 종합하여 볼 때 황사시 대기 중 라돈농도가 높게 나타난 것은 라돈의 주 발생원은 토양으로 황사 발생시 중국에서부터 날아온 모래 먼지로부터 직접 방출된 라돈의 농도에 비해 극미량이며, 이 논문의 경우 모래먼지와 함께 수송된 라돈이 서울 대기중의 라돈농도에 영향을 미친 것으로 사료된다. 이와 같은 결과를 통해 자연방사선 물질이며, 또한 불활성 기체라는 특성을 가진 라돈은 동북아지역의 대기오염물질의 장거리 이동을 살피는데 있어 매우 유용한 자연적 tracer로 사료된다.

## V. 결 론

최근 들어 오염물질의 장거리 이동에 관한 국제적인 관심이 증가되고 있다. 우리나라의 경우 중위도 편서풍 지대에 위치하여 서풍계열의 기류에 큰 영향을 받고 있어 중국에서 발생하는 자연적·인위적인 대기오염물질의 이동은 우리에게 큰 관심을 갖게 하며 대기 중 오염물질의 증가는 국가적 환경문제로 대두되고 있다. 그러나 중국에서 발생한 대기오염물질은 서해를 넘

어 이동하면서 화학적 성분이 변화하기 때문에 대기오염물질의 장거리 이동을 명확하게 설명할 수 없는 한계를 가지고 있다. 이에 본 연구는 다른 물질과 화학적 결합 또는 부착하지 않는 것으로 알려진 자연방사선 물질인 라돈의 서울시 대기중 농도를 1999년 12월부터 2002년 1월까지 장기간 연속적으로 관측하고 관측된 결과를 다각적 통계 분석을 실시하여 그 결과를 제시함으로써 향후 라돈을 이용한 동북아 장거리이동에 관한 연구분야의 활성화를 도모하는 한편 관련 기초연구자료를 제공하고자 하였다. 본 연구 결과는, 대기 중 라돈농도의 일별, 계절별 분포는 대단히 규칙적인 양상을 지니고 있는 것으로 조사되었다. 일일 시간별 라돈농도 분포 및 계절별 일일 시간별 라돈농도분포에서 주간대에 비해 야간대에 라돈 농도가 증가하는 현상은 역전층의 형성과 같은 단주기적 기상현상과 일치하는 결과를 나타냈으며, 또한 가을-겨울이 봄-여름에 비해 높은 농도분포를 보인 계절적 분포 또한 계절별 대기 혼합고의 높이의 차이와 일치하는 결과를 나타내 라돈은 대기의 수직확산을 살피는데 있어 좋은 자연적 tracer로써 제시할 수 있었다. 또한 중국 및 일본에서 선행된 연구결과와 황사일과 비황사일의 서울시 대기중의 라돈농도의 차이 검정결과를 바탕으로 라돈은 동북아지역의 대기오염물질의 장거리 이동을 살피는데 있어 매우 유용한 tracer로써 제시할 수 있었다.

### 참고문헌

- NASA : NASA Science News, [http://science.nasa.gov/headlines/y2001/ast30aug\\_1.html](http://science.nasa.gov/headlines/y2001/ast30aug_1.html) list539000. 2001.
- 신혜정, 김지영, 최병철, 오성남, Yu, J., Bower, K. : ACE-Asia 집중 관측기간에 제주고산에서 측정된 대기오염물질의 농도 분포특성. *한국대기환경학회지* **18**, 487-501, 2002.
- 윤용황 : 한반도에 수송되는 황사시의 특징에 관한 연구. *한국기상학회지* **26**, 203-207, 1997.
- Jamil, K., Al-ahmady, K. K., Fazal-ur-Rehman, S. A., Qureshi, A. A. and Khan, H. A. : Relative performance of different types of passive dosimeters employing solid state nuclear track detectors. *Health Physics*, **73**, 629-632, 1997.
- Iida, T., Ikebe, Y., Suzuki, K., Ueno, K., Wang, Z. and Jin, Y. : Continuous measurements of outdoor radon concentration at various locations in east Asia. *Environment International*, **22**, 139-147, 1996.
- Borak, T. B. and Baynes, S. A. : Continuous measurements of outdoor  $^{222}\text{Rn}$  concentrations for three years at one location in colorado. *Health Physics*, **76**, 418-420, 1999.
- Chino, M., Yamazawa, H. and Iida, T. : Continuous measurements of outdoor  $^{222}\text{Rn}$  concentration model using a hydrodynamic meteorological mode. *Health Physics*, **70**, 47-54, 1996.
- Porstendorfe, J., Butterweck, G. and August, R. : Daily variation of the radon concentration indoors and outdoors and the factors of meteorological parameters. *Health Physics*, **67**, 283-287, 1994.
- Taguchi, S., Iida, T., Ikebe, Y., Abs, S. and Hata, T. : Evaluation of the atmospheric transport model NIRE-CTM-96 by using measured radon-222 concentration. *Tellus 54B*. pp.250-268, 2002.
- 김순애, 백남원 : 도시 일부지역에서의 실내 라돈농도에 관한 연구. *한국환경보전학회지* **28(2)**, 89-98, 2002.
- 김윤신, 이철민, 김현탁, Iida, T. : Alpha track detector를 이용한 실내의 라돈 농도조사에 관한 연구. *한국환경보전학회지* **28(5)**, 71-76, 2002.
- 이철민, 김윤신, 김종철, 전형진 : 서울시 자하철역사의 라돈농도분포 조사. *한국환경보전학회지* **30(5)**, 469-480, 2004.
- Iida, T. : An electrostatic radon monitor for the continuous measurement of environmental radon in Atmospheric Radon Progeny and environmental Radioactivity. Okabe. Atomic Energy Society of Japan. pp.66-73, 1985.
- Iida, T., Ikebe, Y. and Tojo, T. : An electrostatic radon monitor for measurements of environmental radon. *Research Letter Atmospheric Electricity*, **11**, 55-59, 1991.
- 박일수, 이덕길, 강인구 : 서울지역 겨울철  $\text{SO}_2$  농도를 지배하는 기상인자. *한국대기보전학회지* **7**, 96-104, 1991.
- 김기연, 김민영, 신재영, 최규훈, 강창희 : PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, TSP의 시간대별 관측결과에 기초한 황사기간 중 분진의 분포특성에 대한 고찰 : 서울시의 4대 관측점을 중심으로한 2001년 봄철 황사기간에 대한 사례연구. *한국대기환경학회지* **18**, 419-426, 2002.
- 전영신, 김지영, 최재천, 신도식 : 황사시 서울과 안면도의 대기 중 에어로졸 농도 특성. *한국대기환경학회지* **15**, 575-586, 1999.
- 김우구, 전영신, 이원환, 김현미 : 서울 부유분진 농도와 황사 특성에 관한 사례 연구. *한국대기보전학회지* **11**, 199-209, 1995.
- 박민하, 김용표, 강창희 : 황사/비황사의 입자 조성 변화 : 1992-1996년 봄철 고산 측정자료. *한국대기환경학회지* **17**, 487-492, 2001.
- Sesana, L., Carpioli, E. and Marazzan, G. M. : Long period study of outdoor radon concentration in Milan and correlation between its temporal variations and dispersion properties of atmosphere. *Journal of Environmental Radioactivity*, **65**, 147-160, 2003.
- Zhuo, W., Iida, T., Yamada, K. and Kim, Y. S. : An outline survey of indoor and outdoor  $^{222}\text{Rn}$  concentrations in south korea. *Health Physics*, **33**, 401-406, 1998.