

제주도 고산측정소의 대기 라돈농도 시계열 변화 Time-series Variation of Atmospheric Radon Concentrations at Gosan Site, Jeju Island

고희정 · 신승희 · 허철구¹⁾ · 김원형 · 강창희* · 강동훈²⁾ · Scott Chambers³⁾

제주대학교 화학과, ¹⁾제주대학교 환경공학과,

²⁾기상청 기후변화감시센터, ³⁾호주핵과학기술기구

(2012년 12월 7일 접수, 2013년 1월 18일 수정, 2013년 1월 20일 채택)

Hee-Jung Ko, Seung-Hee Sin, Chul-Goo Hu¹⁾, Won-Hyung Kim,
Chang-Hee Kang*, Dong-Hun Kang²⁾ and Scott Chambers³⁾
Department of Chemistry, Jeju National University

¹⁾*Department of Environmental Engineering, Jeju National University*

²⁾*Korea Global Atmospheric Watch Center, Korea Meteorological Administration*

³⁾*Australian Nuclear Science and Technology Organisation*

(Received 7 December 2012, revised 18 January 2013, accepted 20 January 2013)

Abstract

The realtime monitoring of radon (²²²Rn) concentrations has been carried out from Gosan site, Jeju Island for three years of 2006~2008, in order to evaluate the background level and timely variational characteristics of atmospheric radon. The mean concentration of radon measured during the studying period was 2965 mBq/m³ with its annual mean values in the range of 2768~3124 mBq/m³. The relative ordering of the seasonal mean concentrations was seemed to vary such as winter (3578 mBq/m³) > fall (3351 mBq/m³) > spring (2832 mBq/m³) > summer (2073 mBq/m³). The monthly mean concentrations were in the order of Jan > Feb > Oct > Nov > Dec > Mar > Sep > Apr > May > Jun > Aug > Jul, so that the highest January value (3713 mBq/m³) exceeded almost twice as the July minimum (1946 mBq/m³). The hourly concentrations in a day showed the highest level (3356 mBq/m³) at around 7 a.m., increasing during nighttime, while reaching the lowest (2574 mBq/m³) at around 3 p.m. From the backward trajectory analysis for a continental fetch of radon, the high concentrations (10%) of radon matched with the air mass moving from the Asia continent to Jeju area. In contrast, the low concentrations (10%) of radon were generally correlated with the air mass of the North Pacific Ocean. In comparison by sectional inflow pathways of air mass, the radon concentrations were relatively high from the north China and the Korean peninsula.

Key words : Atmospheric radon, Background level, Realtime monitoring, Gosan site, Continental fetch

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)64-754-3545, E-mail : changhee@jejunu.ac.kr

1. 서 론

자연계에 널리 분포하는 주요 라돈 동위원소는 ^{222}Rn (radon), ^{220}Rn (thoron), ^{219}Rn (actinon)의 세 가지이며, 이 중 ^{222}Rn 가 자연 방사선 중에서 가장 많은 부분을 차지한다. 이러한 ^{222}Rn 는 4번의 α -붕괴와 4번의 β -붕괴를 거쳐 최종적으로 ^{206}Pb 으로 안정화된다(Moon *et al.*, 2009; US EPA 2007). 라돈의 배출 원인 우라늄은 지구상의 모든 토양 중에 조금씩 섞여 있기 때문에 모든 토양에서 미량이지만 라돈이 방출된다. 그리고 지각물질로부터 발생되기 때문에 주로 지하 공간에서 높은 농도를 보이고 지하수와 대기 중에서도 미량으로 검출된다. 또한 공기보다 9배나 무거워서 지표면에 가까울수록 농도가 더 높고 용이하게 인체로 흡수되어 인체 위해성을 나타낸다. 또 화학적으로 불활성이기 때문에 반응성이 거의 없고, 기체 상태로 존재하기 때문에 넓게 확산되는 이동 특성을 보인다(Choi *et al.*, 2009; Vogianis and Nikolopoulos, 2008; Vinson *et al.*, 2008; Font *et al.*, 2008; Bonotto and Padron-Armada, 2008; Font and Baixeras, 2003).

라돈은 자체 보다는 라돈 자핵 중인 Po의 α -붕괴에 의해 발생하는 방사선에 의하여 폐 조직을 손상시켜 폐암을 유발하는 것으로 알려져 있다. 즉 호흡 과정에서 흡입되는 라돈 가스는 폐에 흡착되지 않고 다시 호흡을 통해 배출되어 문제를 일으키지 않는다. 그러나 라돈이 붕괴되어 생성되는 라돈 자핵종은 고체물질로 정전기적인 전하를 띤 입자이다. 따라서 공기에 존재하는 먼지, 담배연기, 그리고 수증기에 흡착되어 에어로졸 형태로 폐에 쉽게 흡착된다. 이들 중 일부는 폐에서 제거되거나 기침으로 배출되지만 대부분은 붕괴하면서 α -ray를 방출하여 장기적으로 폐암을 유발하는 것으로 보고되고 있다(Choi *et al.*, 2009; Miles, 1988).

일부 선진국에서는 1980년대부터 정부 주도로 라돈지도 작성과 실내외 라돈 조치기준을 설정하여 체계적으로 라돈 관리대책을 시행하고 있다. 대표적으로 미국은 환경보호국과 주정부에 의해 1980년부터 실내라돈 조사를 실시하였고, 실내라돈 조치기준을 4 pCi/L, 수질 대체기준을 4,000 pCi/L로 설정하였다(Je, 2010; US EPA, 2003). 우리나라도 최근 환경부에

서 지하역사, 지하도 상가 등 17개 다중이용시설군과 학교(지하교실)에 대하여 실내 라돈 권고기준(4 pCi/L)을 설정, 운영하고 있으며, 「지하철역 공기질 개선대책(2007년 7월)」을 수립하였다. 그리고 2007년 8월에 라돈종합관리대책을 발표하여 2012년까지 라돈에 안전한 실내환경조성을 위한 라돈측정기반 구축, 노출현황파악, 노출경로관리 등의 종합적이고 단계적인 대책을 추진하고 있다. 또 2010년에는 실내 라돈 가이드라인을 제시하였고, 국가라돈정보센터(www.radon.or.kr) 및 홍보동영상을 제작하여 대국민 홍보를 기하고 있다. 또한 2008년부터 추진한 전국 라돈지도 작성사업을 2013년까지 완료하여 라돈관리의 과학적 토대를 구축하고, 실내라돈 저감사업을 실시하여 다양한 유형의 표준시공모형을 제시할 예정이다(Je, 2010).

그러나 현재 국내에서 라돈의 관리 및 감시는 주로 실내나 지하 공간을 대상으로 이루어지고 있다. 그리고 아직까지 대기 중의 극미량 라돈을 모니터링하고 감시하기 위한 연구는 거의 이루어지지 못하고 있다. 최근에 외국의 일부 연구팀을 중심으로 라돈을 장거리 수송 대기오염물질들의 추적자로 활용하기 위한 연구를 시도하고 있다. SO_2 , NO_2 등의 대기오염물질은 대기 중에서 이동 중에 화학성분이 변화하기 때문에 대기오염물질의 장거리 이동을 명확하게 설명할 수 없는 한계를 가지고 있다. 이에 반해 라돈은 다른 물질과 화학적으로 반응하지 않는 불활성기체이고 상대적으로 긴 반감기(3.82일)를 갖고 있다. 따라서 충분한 시간 동안 공기 중에 머물러 있기 때문에 대기확산에 의한 대륙기원물질의 장거리 이동을 연구하는데 있어서 유용한 추적물질로 활용이 가능하다(Jamil *et al.*, 1997). ^{222}Rn 은 NO_x , SO_2 , CO , O_3 등의 대기오염물질들과 비슷한 수명을 나타내고 대기 에어로졸들과도 유사한 수명을 보인다. 그리고 라돈의 발생기원이 지각물질이기 때문에 해양에서 이동한 공기에 비해 대륙에서 생성된 공기에서 더 높은 농도를 나타낸다. 따라서 라돈은 대기오염물질의 이동경로를 확인하기 위한 추적자로 활용도가 높다(Kang *et al.*, 2007; Zahorowski *et al.*, 2005, 2004).

또 대기 중 라돈 농도는 혼합고(mixing depth)의 높이에 영향을 받고 있는 것으로 조사되고 있다. 따라서 대기 중의 라돈농도 분포는 대기의 수직 확산을 관찰하는 데에도 매우 유용한 정보를 제공하고,

대기의 수직 확산을 관찰하는데 필요한 추적자로도 활용이 가능하다(Kim *et al.*, 2007). 이처럼 대기 중의 라돈은 그 자체의 관리, 감시는 물론 대기오염물질, 온실가스 등의 발생기원 추적을 위해서도 이용할 수 있다. 대기 라돈을 관리하고 이를 추적자로 활용하기 위해서는 극미량의 대기 중 라돈 농도를 지속적으로 모니터링 할 필요가 있다. 그리고 청정지역에서 대기 배경농도를 평가하기 위한 데이터의 확보가 이루어져야 한다. 특히 한반도의 경우 아시아대륙에서 편서풍 기류를 타고 이동하는 각종 장거리 이동 오염물질의 영향을 평가하기 위하여 대기 라돈을 지속적으로 모니터링할 필요가 있다.

본 연구에서는 제주도 서쪽 끝 지점에 위치한 고산측정소에서 호주핵과학기술기구와 공동으로 라돈 배경농도를 실시간으로 측정하였다. 그리고 2006년부터 2008년까지 3년간의 라돈 시계열 변화와 농도 변화 특성을 조사하였다. 또한 기류의 이동방향에 따른 농도 변화를 비교함으로써 라돈의 장거리 이동 특성과 대기오염물질의 추적자 활용 가능성을 평가하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 측정 설비 및 기기

고산측정소(33° 17'N, 126° 10'E, 제주도 제주시 한경면 고산리 소재 수월봉)에서 대기 중의 라돈(²²²Rn) 농도를 실시간으로 측정하였다. 연구를 수행한 고산측정소는 제주도 서쪽 끝 지점에 위치한 청정지역으로 국지 오염원의 방해가 없는 대기오염 국내 배경지역으로 잘 알려져 있다. 라돈 농도는 2006년 1월부터 2008년 12월까지 3년간 매 30분 간격으로 측정하였다. 측정시스템은 해발 72m에 위치한 고산측정소의 건물 외부에 설치하였다. 라돈 검출기는 배경농도 측정을 위한 고감도 장비로 호주핵과학기술기구(Australian Nuclear Science and Technology Organisation, ANSTO)에서 자체적으로 설계, 제작한 시스템이다. 이 검출기는 필터를 거친 후 자연확산이나 동력펌프를 통해 셀 내로 유입된 라돈 또는 셀 내부에서 생성된 라돈 자핵종에서 방출된 알파입자를 측정하는 방식이다. 알파입자가 ZnS(Ag)와 반응하면 섬광을 발생하고, 이를 광전증배관으로 검출하

여 계수하는 방식이다(Whittlestone and Zahorowski, 1998).

라돈 검출기는 2006년 1월부터 2007년 7월까지의 감도(Sensitivity)가 0.21 counts · sec⁻¹/Bqm⁻³이고, 검출한계(Low limit of detection)가 90 mBq/m³인 장비(ANSTO, Model D700)를 사용하였다. 그리고 2007년 7월부터 2008년 12월까지의 감도가 0.28~0.29 counts · sec⁻¹/Bqm⁻³이고, 검출한계가 25 mBq/m³인 새로운 시스템(ANSTO, Model D1500)을 설치하여 라돈농도를 측정하였다(그림 1). 측정 데이터는 라돈검출시스템에 내장된 data logger(Campbell Scientific, 모델 CR800)와 컴퓨터를 사용하여 30분 간격으로 실시간 저장하였다. 데이터 검정은 월 1회 주기로 5시간 동안 실시하였으며, 검정용 표준물질은 ²²⁶Ra(18.5±4% kBq, Pylon Electronic Inc., 모델 RN-2000A, Canada)를 사용하였다. 또한 검출기의 바탕(background) 값은 대략 3개월 주기로 공기의 유입을 차단한 상태에서 기기 자체의 바탕 농도를 24시간 동안 측정하여 결정하였다. 이 때 바탕값은 검출기의 2차 필터에 포집된 ²¹⁰Pb(반감기 22.3년) 등과 같은 라돈 자핵종의 양에 따라 시간이 경과됨에 따라 서서히 상승하는 경향을 보였다.

2.2 역궤적 분석

라돈의 이동경로 추적을 위한 역궤적 분석은 출발점 고도를 850 mb 면인 1500 m로 설정하였고, 출발 시간은 해당 날짜의 매 00 UTC(KST 09:00)를 이용하였다. 역궤적 분석은 미국해양대기국(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 제공하는 HYSPLIT4(HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 이용하였다. 그리고 고산지역(33° 17'N, 126° 17'E)을 도착지점으로 5일간의 역궤적 경로를 모사하였다. 기상 자료는 미국 NCEP(National Center for Environmental Prediction)의 중규모 기상모델(MRF)인 GDAS(global data assimilation system) 데이터를 이용하였다. 이 때 자료 동화 과정의 마지막 단계에서 얻어진 FNL(Final Run meteorological data) 자료는 1일 4회 6시간 간격(00, 06, 12, 18 UTC)의 모델링을 통해 얻어지고 있으며, 시간 기상자료와 그 다음 6시간 동안의 시간별 예보 자료로 구성되어 있다(Kim *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2003; Draxler, 1996).

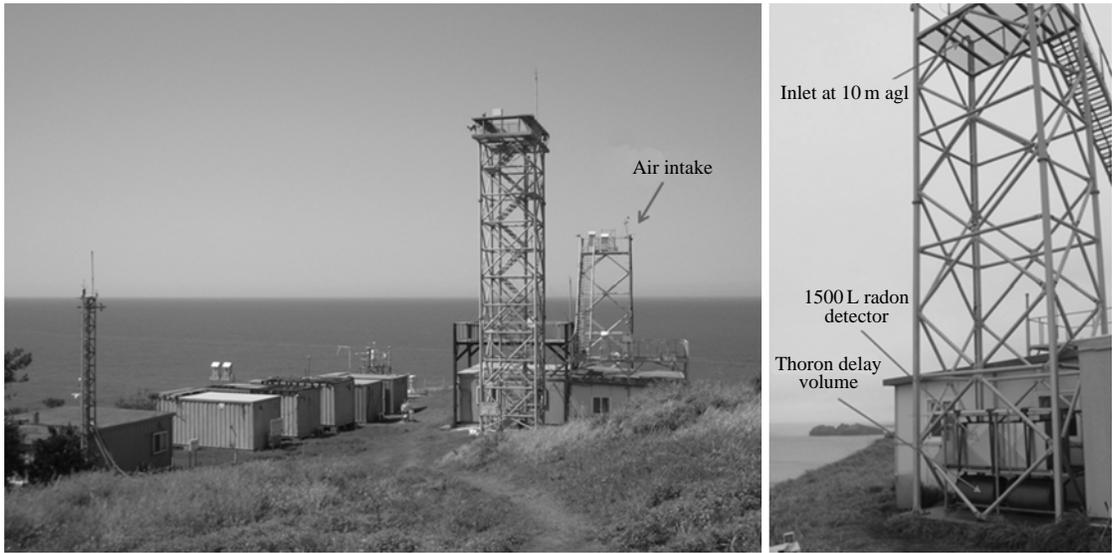


Fig. 1. Installation of the radon detector at Gosan site.

3. 결과 및 고찰

3.1 고산지역의 대기 라돈 농도

라돈은 지표지질, 지하수, 건축자재, 암석, 토양 등에서 방출되어 주로 실내공간에 존재한다. 그러나 화학적으로 불활성이고 빗물에도 거의 용해되지 않기 때문에 대기 중으로 넓게 확산되는 특성을 나타낸다. 그리고 기체상으로 존재하기 때문에 대기 중에서 기류를 타고 이동하여 기단의 발원 조건에 따라 큰 농도차를 보인다. 일반적으로 발생기원이 지각이기 때문에 해양에서 이동한 공기에 비해 대륙에서 생성된 공기에서 2~3배 더 높은 농도를 보이는 것으로 알려져 있다(Choi *et al.*, 2009; Bonotto and Padron-Armas, 2008).

대기 중의 라돈은 실내나 지하 공간에 비해 농도가 훨씬 낮은 농도를 측정해야 하기 때문에 아주 고감도의 검출기를 필요로 한다. 호주핵과학기술기구(ANSTO)에서는 이러한 고감도 라돈검출기를 자체적으로 설계, 제작하고 있다. 그리고 WMO와 GAW 관측소를 중심으로 세계적인 라돈 측정망을 구축하여 운영하고 있다. 이 라돈검출기는 알파입자와 ZnS(Ag)가 반응하여 발생하는 섬광을 광증배관으로 증폭, 계

수하는 섬광셀 검출방식 원리를 이용하고 있고, 실시간으로 연속 모니터링이 가능한 시스템이다. 국내에서는 2001년에 처음으로 제주도 고산 관측소에 ANSTO에서 제작한 라돈검출기(모델 D700)를 설치하여 대기 중의 라돈 농도를 모니터링하기 시작하였다(Chambers *et al.*, 2009; Zahorowski *et al.*, 2005, 2004). 그리고 2007년부터는 훨씬 더 고감도인 라돈검출기(모델 D1500)를 사용하여 국내 대기 중의 라돈 배경농도를 실시간으로 측정하고 있다.

본 연구에서는 ANSTO의 라돈검출기를 이용하여 2006년부터 2008까지 총 3년간 지속적으로 라돈농도를 실시간 모니터링하여 국내 청정지역의 라돈 배경농도 수준을 측정하였다. 표 1과 그림 2~3의 결과와 같이 제주도 고산지역에서 연구기간에 측정된 평균농도는 2965 mBq/m³를 나타내었다. 그리고 연구기간의 연도별 농도는 2006년에 3124 mBq/m³, 2007년에 3007 mBq/m³, 2008년에 2768 mBq/m³로 농도가 다소 다른 경향을 보였다. 또 연도별 농도를 90 분위수(90th percentile)와 10 분위수(10th percentile)로 구분하여 비교한 결과, 90 분위수 농도는 연도별로 다소 다른 추세를 보이나 10 분위수 농도는 별 차이를 나타내지 않는 것으로 조사되었다. 고산지역에서 2001~2006년 측정된 이전의 결과를 보면, 2673~

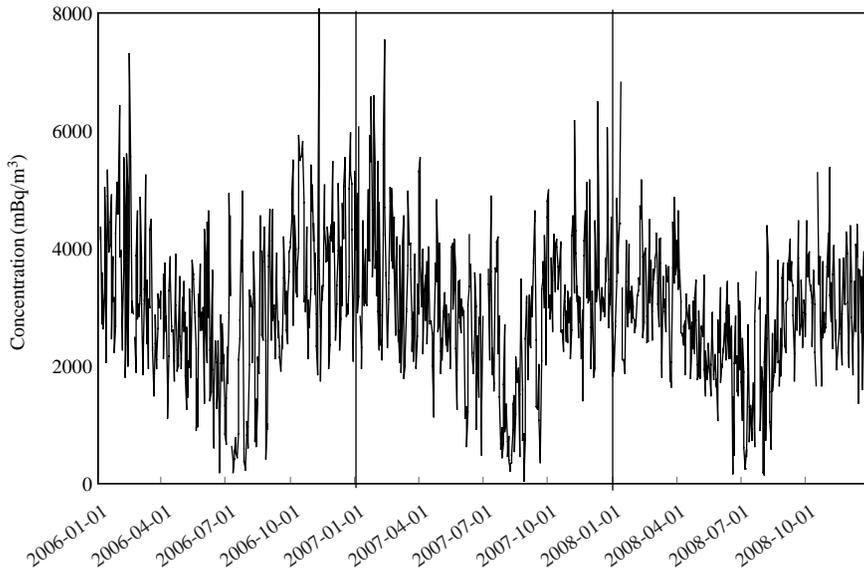


Fig. 2. Variation of daily radon concentrations during January 2006~December 2008.

Table 1. Atmospheric radon concentrations at Gosan and other sites.

Site	Concentration (mBq/m ³)	Periods
Seoul, Korea ¹⁾	7620 ± 4110	1999. 12 ~ 2002. 1
Sado Island, Japan ²⁾	2555 ± 261	2002 ~ 2004
Hok Tsui, Hong Kong ²⁾	5580 ± 626	2002 ~ 2004
Mauna Loa, Hawaii ³⁾	146 ± 97	2001
Hong Kong ⁴⁾	9300	2007. 11 ~ 2008. 10
Milan, Italy ⁵⁾	9500	2000
Gosan, Jeju Island		
2006	3124 ± 1621	2006. 1 ~ 2006. 12
2007	3007 ± 1571	2007. 1 ~ 2007. 12
2008	2768 ± 1286	2008. 1 ~ 2008. 12
Average	2954 ± 1200	2006. 1 ~ 2008. 12

¹⁾Kim et al., 2007; ²⁾Chambers et al., 2009; ³⁾Zahorowski et al., 2005; ⁴⁾Chan et al., 2010; ⁵⁾Sesana, 2003.

3124 mBq/m³의 범위이며 연도별로 큰 차이를 보이지 않았던 것으로 나타나고 있다. 그러나 이 시기에 농도가 다소 다른 추세를 보인 것은 2007년 7월 에 라돈 검출기를 더 고감도 시스템으로 교체하면서 공기 흡입관의 높이를 5 m에서 10 m로 높였기 때문에 이에 기인한 변화로 보인다.

또한 표 1에 고산지역의 라돈농도를 국내외 타 지역들과 비교하였다. 국내의 경우 라돈 모니터링 데이

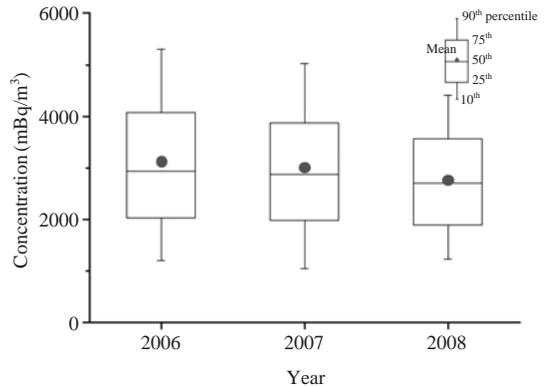


Fig. 3. Comparison of the radon concentrations for three years between 2006 and 2008.

타는 주로 실내와 지하 공간을 중심으로 측정 결과 들이 발표되고 있고, 대기 중 농도를 측정 한 결과는 거의 없는 상태이다. 따라서 이를 Kim et al. (2007년) 이 1999년 12월부터 2002년 1월에 능동형 Electrostatic Radon Monitor를 사용하여 서울 성동구에서 측정한 결과와 비교해 보았다(Kim et al., 2007). 이 시기의 서울지역 라돈 농도는 7620 ± 4110 mBq/m³의 범위를 보이고 있으며, 이에 비해 고산지역은 2.6배

정도 더 낮은 농도를 나타내고 있다. 또한 외국 청정지역의 농도를 보면, 하와이 Mauna Loa는 146 mBq/m³, 일본의 Sado Island는 2555 mBq/m³, 홍콩 Hok Tsui는 5580 mBq/m³를 나타내었다(Chambers *et al.*, 2009; Zahorowski *et al.*, 2005). 이를 고산지역과 비교해 보면, Hok Tsui보다는 1.9배 정도 낮으나 Mauna Loa와 Sado Island보다는 각각 20, 1.2배 정도 더 높은 수준을 보이고 있다. 그러나 Mauna Loa 관측소의 경우, 3397 m 고도에 위치하고 있고, 대륙으로부터 멀리 떨어진 청정지역이기 때문에 고산지역과는 큰 차이를 보이는 것으로 보인다. 하지만 홍콩의 King's Park Meteorological Station이나 이탈리아의 도심지인 Milan 지역에 비해서는 고산지역이 각각 3.1, 3.2배 더 낮은 배경지역의 특성을 나타내고 있는 것으로 조사되었다.

3.2 라돈 농도 시계열 변화

3.2.1 월별, 계절별 농도 변화

측정기간의 라돈농도 월별 변화를 그림 4에 나타냈다. 그림에서 평균농도는 3년간의 시간별 농도를 기준으로 월별로 평균한 값이고, 각각을 중앙값과 90, 75, 50, 10 분위수 농도로 구분하여 나타낸 결과이다. 이러한 월별 비교에서 라돈은 Jan > Feb > Oct > Nov

> Dec > Mar > Sep > Apr > May > Jun > Aug > Jul의 순으로 높은 농도를 보였다. 그리고 월별로는 1월에 3713 mBq/m³로 가장 높고, 7월에 1946 mBq/m³로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 또한 그림 5와 같이 3년간의 월별 농도를 90 분위수와 10 분위수로 구분하여 비교해 본 결과, 90 분위수 농도는 대체적으로 비슷한 경향을 보이거나 평균농도가 가장 낮은 7~8월보다도 5~6월에 더 낮았다. 그러나 10 분위수 농도는 월별 평균농도와 유사한 추세를 나타내어 고농도와 저농도 시에 다소 차이를 보였다. 또 일별 고층기상자료를 이용하여 라돈농도와 고층(850 hPa) 풍향을 상호 비교해 본 결과, 라돈 농도가 높은 1~2월에는 주로 북서계열의 바람이 불었고, 반대로 농도가 낮은 6~9월에는 주 풍향이 남동풍이었음을 확인할 수 있었다. 이처럼 고산지역의 라돈농도는 기류가 대륙에서 이동할 때 더 고농도를 나타내고 불규칙적인 패턴을 보이는 반면 기류가 북태평양에서 유입되었을 때는 저농도를 유지하면서 변동폭도 상대적으로 작았음을 알 수 있었다.

연구 기간의 라돈 농도를 계절별로 비교하여 그림 6에 나타내었다. 라돈 계절별 평균농도는 봄철에 2832 mBq/m³, 여름철에 2073 mBq/m³, 가을철에 3351 mBq/m³, 겨울철에는 3578 mBq/m³로 사계절 중 겨울철에 가장 높은 농도를 보였고, 다음으로 가을,

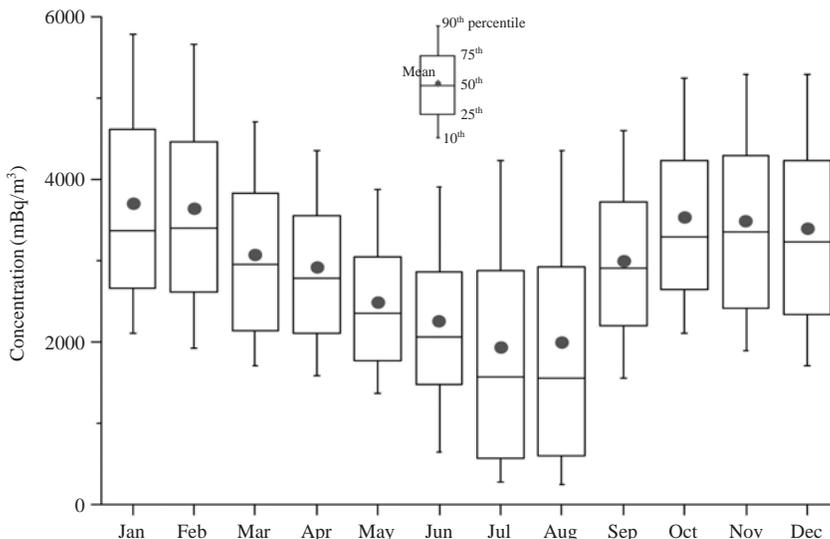


Fig. 4. Monthly comparison of the radon concentrations at Gosan site.

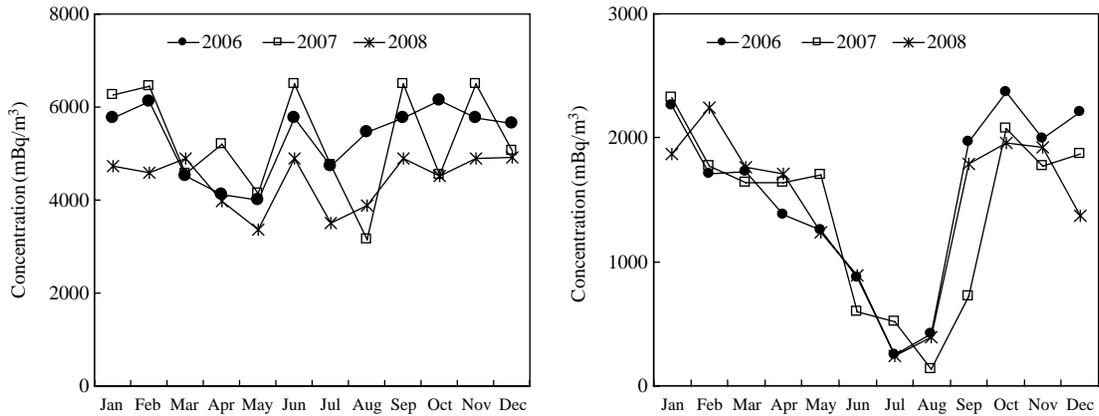


Fig. 5. Monthly comparison of the 90th percentile (left) and the 10th percentile (right) of radon concentrations during 2006~2008.

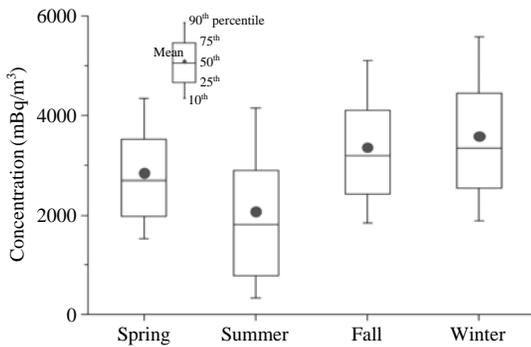


Fig. 6. Seasonal comparison of the radon concentrations during the study period.

봄, 여름 순이었다. 이처럼 계절별 라돈농도가 차이는 나는 이유는 북서계열 풍향이 주류를 이루는 겨울철에 대기가 대륙의 영향을 많이 받고, 반대로 남동 계절풍의 영향으로 해양으로부터 공기가 이동하여 여름철에 농도가 낮은 원인으로 보인다. 또한 90 분위수와 10 분위수 농도를 비교해 본 결과, 두 분위의 농도가 모두 계절별 평균농도와 유사한 경향을 나타내었다. 또 대기 혼합고의 높이는 대기경계층(planetary boundary layer)이 대류상태에 있고 대기오염물이나 대상 성분기체 농도가 균일한 연직분포를 이루고 있을 때의 혼합층 높이로 대기오염물의 누적, 확산, 희석에 중요한 역할을 한다(Kim *et al.*, 1985; Duckworth and Sandberg, 1954). 그리고 계절별 대기 혼합고는

대체적으로 가을과 겨울에는 기온이 낮아서 혼합고 높이가 낮아지는 반면, 봄과 여름에는 대기 혼합고의 높이가 상대적으로 높게 나타난다. 따라서 대기 중의 계절별 라돈농도는 이러한 혼합고의 높이에 반비례하여 겨울과 가을이 높은 농도를 유지하고 봄과 여름이 낮은 농도를 유지하는 것으로 추정된다.

3.2.2 일간 농도 변화

3년간의 라돈농도를 시간별로 평균하여 일간 변화를 그림 7에 비교하였다. 그림의 결과와 같이 라돈은 오전 7시에 3356 mBq/m³로 하루 중 가장 높은 농도를 보였고, 오후 3시경에 2536 mBq/m³로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 그리고 대체적으로 야간에 높고 주간에 낮은 경향을 보였다. 일간 변화 패턴은 아침 시간부터 서서히 농도가 낮아지기 시작하여 오후 3시경까지 감소하였고 다시 저녁시간에 농도가 상승하여 밤에 점차로 농도가 높아지는 추세를 보였다. 이러한 경향은 대기의 혼합고의 변화에 기인하는 것으로 추측된다. 혼합고 높이는 날씨가 맑을 때에는 낮은 오전이나 오후의 낮 동안에 가장 높아 대기 경계층까지 이르게 되고 이 높이가 이내의 대기오염물은 난류에 의해 균일하게 연직분포를 이루게 된다. 따라서 이때의 혼합고는 해당 혼합고 높이와 같아지게 된다. 그러나 밤이나 이른 아침에는 지표 가까이에 안정된 복사역전층이 형성되며 이 경우 연직 혼합이 일어나지 않으므로 해당 혼합고 높이는 역전층의 높이보다 낮아지게 된다(Kim *et al.*, 1985). 따라서 주간

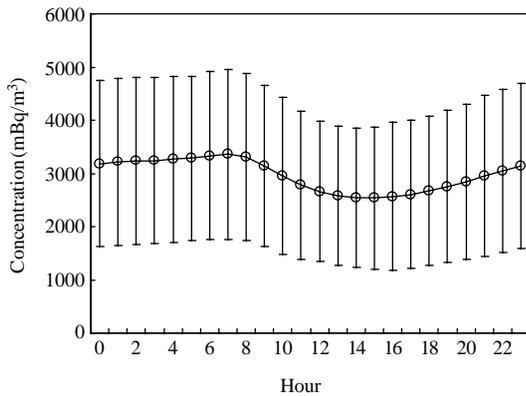


Fig. 7. Hourly comparison of the radon concentrations at Gosan site.

에 혼합고가 최대로 확장되어 라돈이 확산되므로 낮은 농도를 보이고, 야간에는 혼합고가 낮아져서 그만큼 라돈이 농집되어 높은 농도를 보이는 것으로 추정된다. 이처럼 일간 라돈농도는 월, 계절 변화와 마찬가지로 혼합고의 확장 및 축소에 따라 라돈이 확산 또는 압축되면서 농도 변화를 일으키고 있는 것으로 판단된다.

3.3 라돈의 장거리 수송 특성

라돈은 화학적으로 불활성이기 때문에 대기 중에서 반응성이 없고, 빗물에도 거의 용해되지 않는다. 그리고 기체상으로 존재하기 때문에 대기 중에서 기류를 타고 멀리 이동하여 넓게 확산되는 특성을 나타낸다. 또 공기보다 무겁기 때문에 고도가 높아질수록 더 낮은 농도를 나타내며, 기단의 발원 조건에 따라 큰 농도차를 보인다. 또 발생기원이 지각이기 때문에 해양에서 이동한 공기에 비해 대륙에서 생성된 공기에서 2~3배 더 높은 농도를 보이는 것으로 조사되고 있다. 특히 라돈은 대기 중에서 NO_x, SO₂, CO, O₃ 등과 수명이 비슷하고 에어로졸의 대기 체류 시간과도 유사한 수명을 보인다. 따라서 이들 대기오염물질의 대기 중에서의 이동경로를 파악하기 위한 추적자로 활용이 가능하다(Zahorowski *et al.*, 2004). 따라서 본 연구에서는 역궤적 분석을 통하여 라돈의 장거리 이동 경로를 추적하였다. 2006년 1월부터 2008년 12월까지 측정된 라돈 데이터를 이용하여 이 중 일평균 농도가 높은 상위 10%와 상대적으로 농도

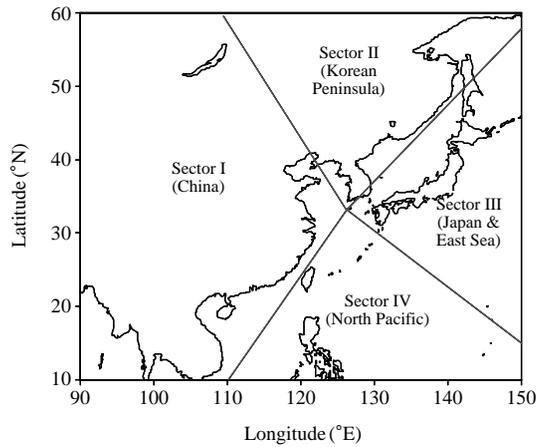


Fig. 8. Sectional classification of the Northeast Asia for backward trajectory analysis based on Gosan site.

가 낮은 하위 10%를 대상으로 이 시기의 기단 이동을 역궤적 분석을 실시하여 궤적을 추적하였다. 역궤적 분석은 미국해양대기국(NOAA)에서 제공하는 HYSPLIT4 모델과 북반구 FNL 및 GDAS 자료를 이용하였다. 또 중국대륙에서 발생한 대기오염물질의 경우, 대략 4일 이내에 한반도에 도달한다는 점을 감안하여 모사시간을 5일(120시간)로 설정하였다. 그리고 이러한 역궤적 분석 결과를 기초로 그림 8과 같이 제주도 주변지역을 임의로 중국대륙(Sector I), 한반도(Sector II), 일본 및 동해(Sector III), 북태평양(Sector IV)의 4개 구역으로 구분하여 유입된 기단의 이동경로를 조사하였다.

본 연구기간의 일평균 라돈농도(1,074개)에서 농도가 높은 상위 10%(108개)의 평균농도는 5155 mBq/m³, 하위 10%(108개)의 평균농도는 823 mBq/m³이었고, 이들 고농도와 저농도 간에는 약 6배의 차이를 나타내었다. 또 그림 9와 같이 역궤적분석 결과를 이용하여 농도가 높은 상위 10% 경우의 기류 이동경로를 조사해 본 결과, 75%(81개)가 Sector I로부터 유입되어 고농도 시에는 대부분 기류가 중국대륙에서 제주지역으로 기류가 이동하였음을 알 수 있었다. 그리고 나머지 Sector II, Sector III, Sector IV에서는 각각 20(22개), 3(3개), 2(2개)%의 유입빈도를 나타내었다. 이 때 구간별 평균농도는 표 2의 결과와 같이 Sector I, Sector II, Sector III, Sector IV에서 각각 5220, 4967, 4703, 5234 mBq/m³이었다. 그

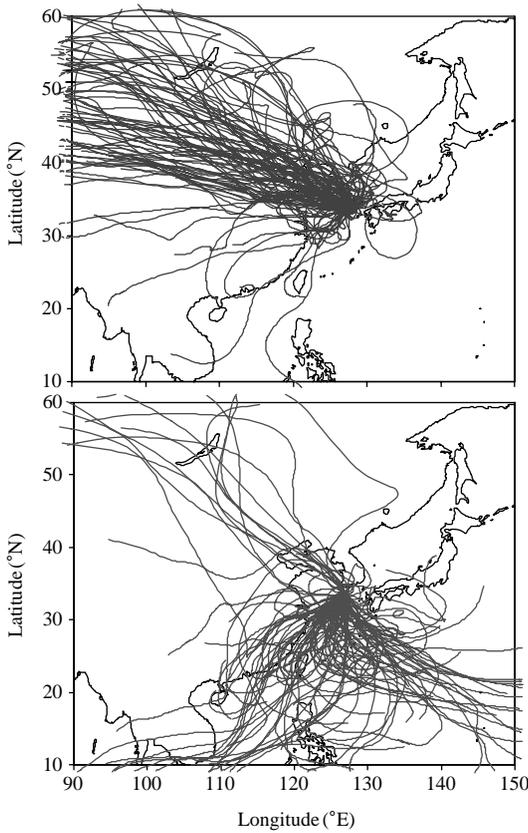


Fig. 9. 5-Day backward trajectories corresponding to high (upper) and low (lower) 10% of radon concentrations.

러나 Sector IV의 경우, 빈도가 2회 뿐이고 이 또한 타 지역을 경유하여 유입되었기 때문에 순수하게 해양에서 발원한 기단은 아닌 것으로 판단된다. 따라서 이를 제외한 나머지 구간을 대상으로 농도를 비교해 본 결과, 대체적으로 Sector I으로부터 기류가 이동하였을 때 가장 높은 농도를 나타내었다. 또한 상위 10% 고농도 시의 계절별 분포를 조사해 본 결과, 봄철 9% (10개), 여름철 6% (6개), 가을철 31% (34개), 겨울철 54% (58개)로 고농도의 85% 정도가 가을, 겨울철에 집중되어 있음을 확인할 수 있었다. 또 계절별 평균농도는 표 3과 같이 겨울철이 5251 mBq/m³ 정도로 가장 높고, 여름철이 4753 mBq/m³으로 낮은 농도를 나타내었다. 반면에 하위 10% 저농도를 대상으로 기류의 이동경로를 조사해 본 결과에서는 66%

Table 2. Sectional radon concentrations corresponding to high and low 10% of concentration levels.

Radon level	Concentration (mBq/m ³)			
	Sector I	Sector II	Sector III	Sector IV
High 10%	5220 (n=81)	4970 (n=22)	4703 (n=3)	-
Low 10%	969 (n=28)	1394 (n=4)	1115 (n=4)	710 (n=71)

Table 3. Seasonal radon concentrations corresponding to high and low 10% of radon levels.

Radon level	Concentration (mBq/m ³)			
	Spring	Summer	Fall	Winter
High 10%	4926 (n=10)	4753 (n=6)	5128 (n=34)	5251 (n=58)
Low 10%	1176 (n=9)	756 (n=90)	987 (n=6)	1439 (n=3)

(71개)가 Sector IV에서 유입되었고, 대체적으로 북태평양의 해양에서 제주지역으로 기류가 이동하는 경향을 보였다. 그리고 나머지 Sector I, Sector II, Sector III에서의 유입빈도는 각각 26 (28개), 4 (4개), 4 (4개)%를 나타내었다. 이 때 각 구간별 평균농도는 Sector I, Sector II, Sector III, Sector IV가 각각 989, 1394, 1115, 710 mBq/m³로 구간별 평균 농도는 Sector II가 1394 mBq/m³로 가장 높고, Sector IV에서 710 mBq/m³로 가장 낮은 값을 보였다. 반면에 하위 10%에 대한 계절별 빈도는 봄철 8% (9개), 여름철 83% (90개), 가을철 6% (6개), 겨울철 3% (3개)로 대부분 여름철에 낮은 농도를 보였다. 그리고 계절별 평균농도는 겨울철이 1439 mBq/m³로 가장 높은 값을 보였으며, 여름철이 756 mBq/m³로 가장 낮은 수치를 나타내었다.

4. 결 론

제주도 고산지역에서 대기 중의 라돈 농도를 실시간 모니터링한 결과로부터 시계열 변화 및 이동 특성을 조사하였다. 연구기간 동안 라돈의 평균농도는 2965 mBq/m³로 국내 서울지역에 비해 2.6배 더 낮았다. 그리고 해외 배경지역인 홍콩의 Hok Tsui보다는 1.9배 낮으나 일본의 Sado Island와 하와이의 Mauna

Loa보다는 각각 1.2배, 20배 더 높은 농도를 나타내었다. 계절별로는 겨울>가을>봄>여름의 순으로 높은 농도를 보였다. 월별로는 1월에 3713 mBq/m³로 최고 농도, 7월이 1946 mBq/m³로 최저 농도를 나타내었다. 일간 변화는 주간에 비해 야간에 더 높고 오전 7시경에 최고농도(3356 mBq/m³), 혼합고가 최대가 되는 오후 2~3시경 최저 농도(2536 mBq/m³)를 나타내었다. 역궤적 분석을 통해 라돈의 유입경로를 추적해 본 결과, 농도가 높을 때는 대부분 기류가 중국대륙으로부터 제주지역으로 유입되었고, 농도가 낮은 시기에는 주로 해양(북태평양)으로부터 유입된 것으로 확인되었다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업 (CATER 2012-3010)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

Bonotto, D.M. and P.C. Padron-Armada (2008) Radon and progeny (214Pb and 214Bi) in urban water-supply systems of Sao Paulo State, Brazil, *Appl. Geochem*, 23, 2829-2844.

Chambers, S., W. Zahorowski, K. Matsumoto, and M. Uematsu (2009) Seasonal variability of radon-derived fetch regions for Sado Island, Japan, based on 3 years of observations: 2002~2004, *Atmospheric Environment*, 43, 271-279.

Chan, S.W., C.W. Lee, and K.C. Tsui (2010) Atmospheric radon in Hong Kong, *Journal of Environmental Radioactivity*, 101(6), 494-503.

Choi, I.C., S.H. Shin, and W.K. Jo (2009) Evaluation of Radon Levels in Various Public-access Buildings or Underground Facilities, and Their Temporal Variation in Underground Facilities, *J. Environ. Toxicol.*, 24(3), 203-211.

Draxler, R.R. (1996) Boundary layer isentropic and kinematic trajectories during the August 1993 North Atlantic Regional Experiment Intensive, *Journal of Geophysical Research*, 101(D22), 29255-29268.

Duckworth, F.A. and J.S. Sandberg (1954) The effect on cities upon horizontal and vertical temperature gradients, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 35,

198-207.

Font, L., C. Baixeras, and V. Moreno (2008) Indoor radon levels in underground workplaces of Catalonia, Spain, *Radiation Measurements*, 43, S467-S470.

Font, L. and C. Baixeras (2003) The RAGENA dynamic model of radon generation, entry and accumulation indoors, *Science of The Total Environment*, 307, 55-69.

Jamil, K., K.K. Al-Ahmady, Fazal-ju-Rehman, S. Ali, A.A. Qureshi, and H.A. Kahn (1997) Relative performance of different types of passive dosimeters employing solid state nuclear track detectors, *Health Physics*, 73(4), 629-632.

Je, H.K. (2010) Overview of Recent Radon Policy and Radon Industry in and outside the Country, *J. KSGE*, 47(3), 400-405.

Kang, C.H., H.J. Ko, and W. Zahorowski (2007) Radon and TSP Concentrations in the Ambient Air of Gosan Area, Jeju Island between 2001 and 2004, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 23(5), 612-624. (in Korean with English abstract)

Kim, E.H., P.S. Kim, C.Y. Kim, K.S. Lee, and K.D. Kwon (1985) Determination of the Mixing Height in Seoul by the Radioactivity Measurement of Radon in Air, *Bulletin of Environmental Sciences (Research Institute for Environmental Sciences Hanyang University)*, 6(2), 129-136.

Kim, K.W., S.Y. Bang, and J.H. Jung (2008) Variation of Concentration of Air Pollutants with Air Mass Back-Trajectory Analysis in Gyeongju, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 24(2), 162-175. (in Korean with English abstract)

Kim, N.K., Y.P. Kim, C.H. Kang, and K.C. Moon (2003) Characteristics of ion Concentrations of PM_{2.5} Measured at Gosan: Measurement Data between 1998 and 2002, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 19(3), 333-343. (in Korean with English abstract)

Kim, Y.S., C.M. Lee, K.Y. Kim, H.J. Jeon, J.C. Kim, and Takao Iida (2007) 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, *Kor. J. Env. Hlth.*, 33(4), 283-292.

Miles, J. (1988) Development of maps of radon-prone areas using radon measurements in houses, *Journal of Hazardous Materials*, 61, 53-58.

Moon, K.H., J.S. Kim, J.K. Ahn, H.C. Kim, and H.m. Lee (2009) Long-term Variation of Radon in Granitic Residual Soil at Mt. Guemjeong in Busan, Korea,

- Jour. Petrol. Soc. Korea, 18(4), 279-291.
- Sesana, L., E. Caprioli, and G.M. Marcazzan (2003) 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(2), 147-160.
- US EPA (2003) Assessment of radon risk in home US EPA 402-R-03-003.
- US EPA (2007) A Citizen's Guide to Radon, US EPA 402-K-07-009.
- Vinson, D., T.R. Campbell, and A. Vengosh (2008) Radon transfer from groundwater used in showers to indoor air, *Applied Geochemistry*, 23(9), 2676-2685.
- Vogiannis, E. and D. Nikolopoulos (2008) Modelling of radon concentration peaks in thermal spas: Application to Polichnitos and Eftalau spas (Lesvos Island-Greece), *Science of The Total Environment*, 405, 36-44.
- Whittlestone, S. and W. Zaborowski (1998) Baseline radon detectors for shipboard use: Development and deployment in the First Aerosol Characterization Experiment (ACE 1), *Journal of Geophysical Research*, 103(D13), 16743-16751.
- Zaborowski, W., S. Chambers, T. Wang, C.H. Kang, I. Uno, S. Poon, S.N. Oh, S. Wercqynski, J. Kim, and A. Henderson-Sellers (2005) Radon-222 in boundary layer and free tropospheric continental outflow events at three ACE-Asia sites, *Tellus*, 57(2), 124-140.
- Zaborowski, W., S.D. Chambers, and A. Henderson-Sellers (2004) Ground based radon-222 observations and their application to atmospheric studies, *Journal of Environmental Radioactivity*, 76(1-2), 3-33