

제주도 고산지역의 대기 라돈 배경농도 및 시계열 변동

Background Level and Time Series Variation of Atmospheric Radon Concentrations at Gosan Site in Jeju Island

송정민 · 부준오 · 김원형 · 강창희* · 고희정¹⁾ · S. Chambers²⁾

제주대학교 화학·코스메틱스학과, ¹⁾국립기상과학원 환경기상연구과, ²⁾호주핵과학기술기구

(2017년 3월 6일 접수, 2017년 3월 12일 수정, 2017년 3월 24일 채택)

Jung-Min Song, Jun-Oh Bu, Won-Hyung Kim, Chang-Hee Kang*,
Hee-Jung Ko¹⁾ and S. Chambers²⁾

Department of Chemistry and Cosmetics, Jeju National University

¹⁾*Environmental Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences*

²⁾*Australian Nuclear Science and Technology Organisation, Locked Bag 2001, Kirrawee DC,
NSW 2232, Australia*

(Received 6 March 2017, revised 12 March 2017, accepted 24 March 2017)

Abstract

The background level and timely variation characteristics of atmospheric ²²²Rn concentrations have been evaluated by the real time monitoring at Gosan site of Jeju Island, Korea, during 2008~2015. The average concentration of atmospheric radon was 2,480 mBq m⁻³ for the study period. The cyclic seasonality of radon was characterized such as winter maximum and summer minimum, consistent with the reduction in terrestrial fetch going to summer. On monthly variations of radon, the mean concentration in October was the highest as 3,041 mBq m⁻³, almost twice as that in July (1,481 mBq m⁻³). The diurnal radon concentrations increased throughout the nighttime approaching to the maximum (2,819 mBq m⁻³) at around 7 a.m., and then gradually decreased throughout the daytime by the minimum (2,069 mBq m⁻³) at around 3 p.m. The diurnal radon cycle in winter showed comparatively small amplitude due to little variability in atmospheric mixing depth, conversely, large amplitude was observed in summer due to relatively a big change in atmospheric mixing depth. The cluster back-trajectories of air masses showed that the high radon events occurred by the predominant continental fetch over through Asia continent, and the radon concentrations from China continent were about 1.9 times higher on the whole than those from the North Pacific Ocean. The concentrations of PM₁₀ also increased in proportion to the high radon concentrations, showing a good linear correlation between PM₁₀ and radon concentrations.

Key words : Atmospheric radon, Background level, Gosan Site, Cluster back-trajectory, Terrestrial fetch

*Corresponding author.

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

1. 서 론

^{222}Rn , ^{85}Kr , ^{210}Pb , ^7Be 은 세계기상기구/지구대기감시소(WMO/GAW)에서 주요 관측요소로 포함시켜 지속적으로 관리하도록 권장하고 있는 대표적인 방사능 물질이다(WMO/GAW, 2001). 이 중에서 ^{222}Rn 은 자연계에 널리 분포하는 주요 자연방사능 물질로 자연방사능 중 인체 노출 방사선량의 50% 이상을 차지한다(Almeida *et al.*, 2004). ^{238}U 의 붕괴사슬 과정에서 ^{226}Ra 의 α -붕괴로 생성된 ^{222}Rn 은 4번의 α -붕괴와 4번의 β -붕괴를 거쳐 최종적으로 ^{206}Pb 으로 안정화된다. 라돈의 주요 동위원소로는 ^{222}Rn (radon), ^{220}Rn (thoron), ^{219}Rn (actinon)이 대표적이다(Moon *et al.*, 2009; WMO/GAW, 2004)

라돈의 모핵종인 우라늄은 토양과 암석의 구성성분이기 때문에 라돈은 모든 토양에서 미량으로 방출된다. 그리고 지각물질로부터 발생되기 때문에 주로 지하 공간이나 지하수에서 높은 농도를 보이고 대기 중에서도 미량으로 검출된다. 또한 공기보다 9배나 무거워서 지표면에 가까울수록 농도가 더 높고 인체에 용이하게 흡수되어 위해성을 나타낸다. 또 화학적으로 불활성이기 때문에 반응성이 거의 없고, 기체 상태로 존재하기 때문에 넓게 확산되는 이동 특성을 보인다(Vinson *et al.*, 2008; Bonotto and Padron-Armada, 2008).

라돈은 자체보다는 라돈 자핵종인 주로 ^{214}Po , ^{218}Po 의 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 붕괴과정에서 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).

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. 대기 라돈을 관리하고 이를 추적자로 활용하기 위해서는 극미량의 대기 중 라돈 농도를 지속적으로 모니터링할 필요가 있다. 특히 한반도의 경우 아시아대륙에서 편서풍 기류를 타고 이동하는 각종 장거리 이동 오염물질의 영향을 평가하기 위하여 대기 라돈을 지속적으로 모니터링할 필요가 있다.

대기 중의 자연방사능 물질 관리를 위해서는 우선적으로 라돈농도 수준을 파악해야 하고, 이를 위해서는 청정지역에서 라돈의 배경농도를 관측할 필요가 있다. 특히 아시아대륙의 편서풍 풍하 측에 위치한 한반도의 경우 대륙에서 발생하여 기류를 타고 장거리 이동하는 여러 대기오염물질과 함께 대기 라돈농도 변화 역시 지속적으로 감시할 필요가 있다. 또한 ^{222}Rn 은 반감기가 3.82일 정도로 주요 대기오염물질(NO_x , SO_2 , CO , O_3 등)과 비슷한 수명을 나타내고 대기 에어로졸과 유사한 수명을 보인다(Zahorowski *et al.*, 2004). 그리고 물에 용해되지 않고 습도, 온도, 일사량에도 안정하여 화학적으로 불활성인 성질을 나타내기 때문에 에어로졸이나 가스상 오염물질의 장거리 수송 특성을 파악하기 위한 지시물질로 활용이 가능하다.

최근에 일부 연구팀을 중심으로 라돈을 장거리 수송 대기오염물질들의 추적자로 활용하기 위한 연구를 시도하고 있다. SO_2 , NO_2 등의 대기오염물질은 대기 중 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 대륙 기원물질의 장거리 이동을 연구하는데 있어서 유용한 추적물질로 활용이 가능하다(Jamil *et al.*, 1997). 특히 ANSTO (Australian Nuclear Science and Technology Organisation)에서는 오래전부터 주요 WMO/GAW 관측소를 중심으로 세계 30여 지점에 라돈검출기를 설치하여 라돈농도를 지속적으로 모니터링하고 있다(Zahorowski *et al.*, 2004).

국내에서는 ANSTO와 공동연구를 통해 청정지역인 제주도 고산관측소에 라돈검출기를 설치하여 2001년 초부터 지속적으로 대기 라돈 배경농도를 모니터링해 오고 있다(Kim *et al.*, 2014; Ko *et al.*, 2013). 본 연구에

서는 2008년부터 2015년까지 제주도 고산관측소에서 측정된 라돈 측정결과를 기초로 배경농도와 시계열 변화 특성을 조사하였다. 그리고 기류의 유입경로에 따른 라돈과 미세먼지의 농도 변화를 비교함으로써 대기 오염물질의 장거리 이동 현상을 파악하기 위한 추적자로서의 활용 가능성을 파악하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 라돈 모니터링

대기 중의 라돈 농도는 제주도 제주시 한경면 고산리 소재 수월봉에 위치한 고산관측소(33°17'N, 126°10'E)에서 측정하였다. 고산관측소는 제주도 서쪽 끝 지점의 제주고산기상대로부터 서쪽 방향으로 약 300 m 떨어진 해발 72 m 언덕위에 위치하고 있다(그림 1). 대기 라돈 농도는 호주핵과학기술기구(ANSTO, Australian Nuclear Science and Technology Organisation)에서 자체적으로 설계, 제작한 고감도 라돈검출기(모델 D1500, 1500 L dual flow loop, two filter radon detector)를 사용하여 2008년 1월부터 2015년 12월까지 30분 간격으로 실시간 측정하였다. 이 검출기는 필터를 거친 후 셀 내로 유입된 라돈 또는 셀 내부에서 생성된 라돈 자핵종에서 방출된 알파입자를 측정하는 방식이다. 알파입자는 ZnS(Ag)와 반응하면 섬광을 발생하고, 이를 광전증배관으로 검출하여 계수하도록 설

계되어 있으며, 검출한계는 약 25~30 mBq m⁻³이다 (Whittlestone and Zahorowski, 1998). 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.

또 검출기의 바탕(background) 값은 대략 3개월 주기로 공기의 유입을 차단한 상태에서 기기 자체의 바탕 농도를 24시간 동안 측정하여 결정하였다. 이때 바탕값은 검출기의 2차 필터에 포집된 ²¹⁰Pb(반감기 22.3년) 등과 같은 라돈 자핵종의 양에 따라 시간이 경과됨에 따라 서서히 상승하는 경향을 보였다. 현장에서 라돈 측정을 위한 공기 주입구는 50 mm HDPE 파이프를 지상 10 m 높이로 설치하여 공기시료를 흡입하였다(그림 2).

2.2 역궤적 분석

대기 라돈의 이동경로 추적을 위한 역궤적 분석은 출발점 고도를 500 m로 설정하였고, 출발시간은 해당 날짜의 매 00 UTC (KST 09:00)로 설정하였다. 역궤적 분석은 미국해양대기국(NOAA/ARL)에서 제공하는 HYSPLIT4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 이용하였다. 그리고 고산지역(33°17'N, 126°10'E)을 도착지점으로 36시간의 역궤

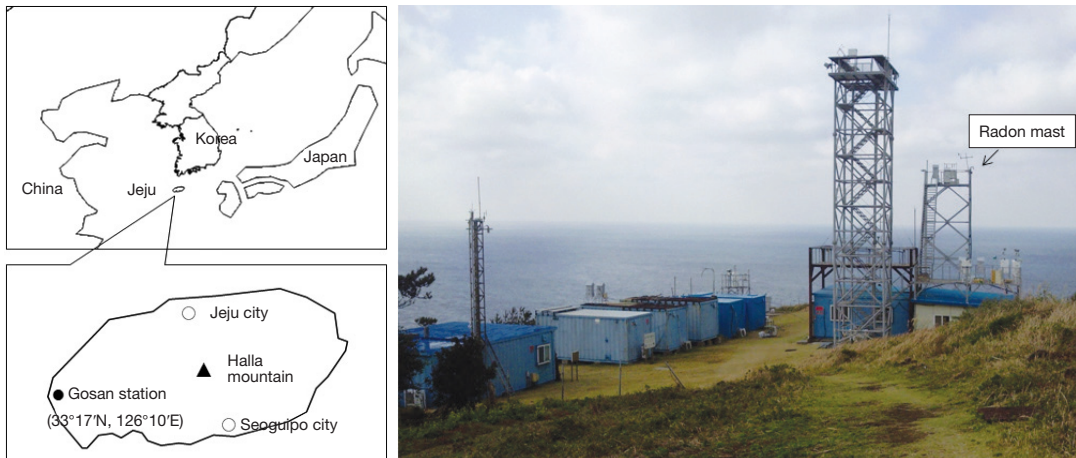


Fig. 1. Location of Gosan station at Jeju Island and field installation of the radon detector.

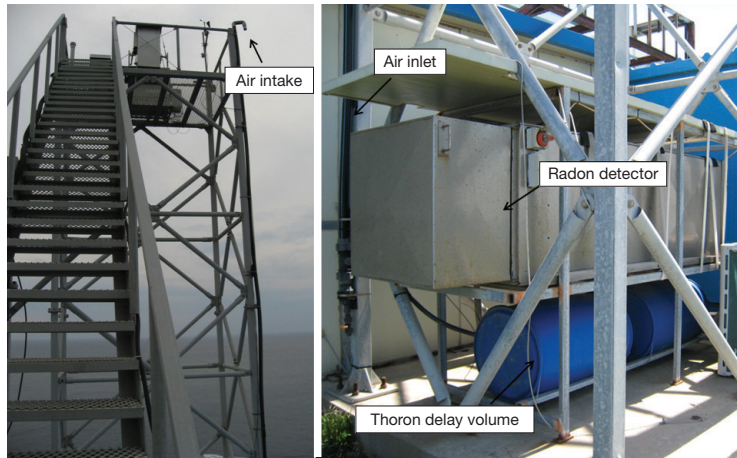


Fig. 2. Installation of the 1500 L radon detector (ANSTO, D1500, Australia).

적 경로를 모사하였고, 역궤적 분석 결과를 기초로 궤적군집분석을 실시하여 기류의 유입경로를 군집화하였다. 이때 사용된 기상 자료는 미국 NCEP (National Center for Environmental Prediction)의 중규모 기상모델(MRF)인 GDAS (global data assimilation system) 데이터를 이용하였다(Draxler and Rolph, 2013).

3. 결과 및 고찰

3.1 고산지역 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-Armada, 2008).

대기 중의 라돈은 실내나 지하 공간에 비해 농도가 훨씬 낮기 때문에 아주 고감도의 검출기를 이용하여 측정할 수 있다. ANSTO에서는 이러한 고감도 라돈검출기를 자체적으로 설계, 제작하고 있다. 그리고 WMO/GAW 관측소를 중심으로 세계 30여 지점에 대

기 라돈 측정망을 구축하여 운영하고 있다. 이의 일환으로 제주도 고산측정소에서는 2001년 초부터 지속적으로 라돈 농도를 측정하고 있으며, ACE (Aerosol Characterization Experiment)-Asia 프로그램 수행을 위해 관측을 시작하였다. 본 연구에서 2008년부터 2015년까지 총 8년간 고산지역에서 라돈 농도를 측정하였고, 측정된 라돈농도로부터 일간 라돈변화를 그림 3에 나타내었다. 제주도 고산지역의 라돈 평균농도는 $2,480 \pm 1,004 \text{ mBq m}^{-3}$ (0.067 pCi/L)로 나타났으며, 이는 2013년 11월부터 2014년 3월까지 측정된 우리나라 실내 평균농도인 106.4 Bq m^{-3} (2.9 pCi/L)에 비해 1/43배 낮은 수준이다. 그리고 동일기간 제주지역의 실내 라돈 농도 88.4 Bq m^{-3} (2.4 pCi/L)에 비해 1/36배 낮은 수준을 보이고 있다(Lee *et al.*, 2016).

그리고 연도별로는 2008년 > 2009년 > 2015년 > 2011년 > 2010년 > 2012년 > 2013년 > 2014년 순으로 2008년에 라돈농도가 $2,777 \text{ mBq m}^{-3}$ 로 가장 높았고, 가장 낮은 농도를 보인 2014년 ($2,184 \text{ mBq m}^{-3}$)에 비해 1.3배 정도의 차이를 보였다.

고산지역 라돈농도를 국내의 타 지역들과 비교한 결과를 표 1에 수록하였다. 국내의 경우 라돈 데이터는 대부분 실내와 지하 공간을 중심으로 측정되고 있고, 대기 농도 측정 결과는 거의 발표되어 있지 않다. 따라서 이를 Kim *et al.* (2007)이 1999년 12월부터 2002년 1월에 능동형 Electrostatic Radon Monitor를 사용하여 서울 성동구에서 측정된 결과와 비교해 보았다. 이 시

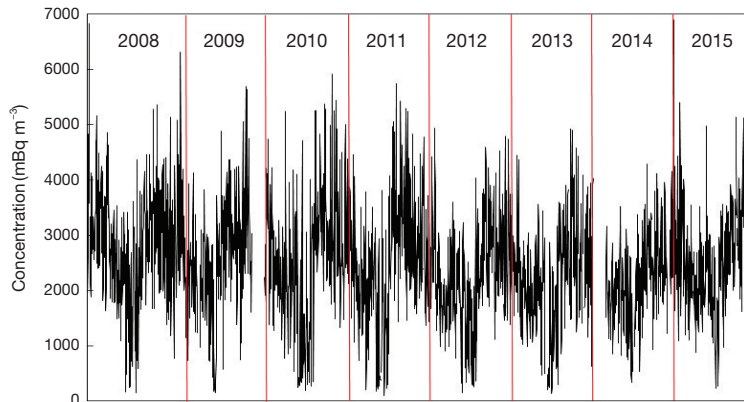


Fig. 3. Variation of daily radon concentrations during 2008~2015.

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

Site	Concentration (mBq m ⁻³)	Periods
Seoul, Korea ¹⁾	7,620 ± 4,110	1999. 12~2002. 1
Sado Island, Japan ²⁾	2,555 ± 261	2002~2004
Hok Tsui, Hong Kong ²⁾	5,580 ± 626	2002~2004
Mauna Loa, Hawaii ³⁾	102	2004~2010
Hong Kong ⁴⁾	9,300	2007. 11~2008. 10
L'Aquila, Italy ⁵⁾	9,700	2009. 3
Bucharest, Romania ⁶⁾	40,260 ± 7,540	2011. 1~2011. 12
Gosan, Jeju Island	2,480 ± 1,004	2008. 1~2015. 12

¹⁾Kim *et al.*, 2007; ²⁾Chambers *et al.*, 2009; ³⁾Chambers *et al.*, 2013; ⁴⁾Chan *et al.*, 2010; ⁵⁾Pitari *et al.*, 2014; ⁶⁾Zoran *et al.*, 2013.

기의 서울지역 라돈 농도는 7,620 ± 4,110 mBq m⁻³로 고산지역에 비해 3.1배 높은 수준을 보이고 있다. 또한 외국 청정지역과의 농도를 비교한 결과에서는 고산지역의 라돈농도가 하와이 Mauna Loa에 비해 24.3배 정도 크게 높은 수준을 보이고 있다. 그러나 홍콩 Hok Tsui보다는 약 2.3배 낮은 농도를 보였다(Chambers *et al.*, 2009; Zahorowski *et al.*, 2005). 고산지역이 하와이 Mauna Loa에 비해 훨씬 더 높은 농도를 나타내는 것은 하와이 Mauna Loa 관측소의 위치가 고도가 3,397 m에 위치하고 있고, 대륙으로부터 멀리 떨어진 청정지역이고 사면이 해양으로 둘러싸여 있기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 도심지역인 홍콩의 King's Park Meteorological Station, 이탈리아의 L'Aquila, 루마니아 남부수도인 Bucharest 지역에 비해 고산지역의 라돈농도는 각각 3.8, 3.9, 18.1배 더 낮은 배경지역의 특성을 나타내고 있는 것으로 조사되었다(Pitari *et al.*, 2014;

Zoran *et al.*, 2013; Chan *et al.*, 2010).

3.2 라돈 농도 시계열 특성

3.2.1 월별, 계절별 농도 변화

2008년부터 2015년에 측정된 라돈농도를 월별로 비교하였고, 그 결과를 그림 4에 수록하였다. 그림에서 평균농도는 8년간의 시간별 농도를 월별로 평균한 값이고, 고농도와 저농도 시의 추세 변화를 확인하기 위하여 중앙값과 90, 75, 25, 10 분위수 농도를 동시에 비교하였다. 그림과 같이 측정기간의 월별 라돈 농도는 Oct > Nov > Feb > Dec > Jan > Sep > Mar > Apr > May > Jun > Aug > Jul의 순으로 10월에 3,041.0 mBq m⁻³로 가장 높고, 7월에 1,480.7 mBq m⁻³로 가장 낮았다. 이러한 경향은 2001~2007년에 고산측정소에서 다른 ANSTO 라돈검출기(모델 D750)를 사용하여 측정된

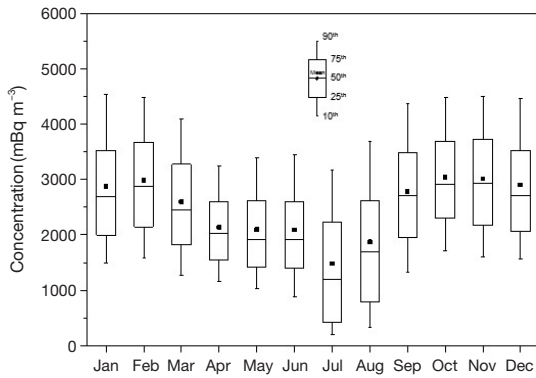


Fig. 4. Monthly variation of the radon concentrations at Gosan site.

결과와 비슷한 변화 패턴을 보이고 있다(Kang *et al.*, 2012). 또한 월별 라돈 농도를 90 분위수와 10 분위수로 구분하여 고농도와 저농도 시의 시계열 변화 특성을 비교하였다. 그 결과 90 분위수 라돈 농도는 1월과 4월이 월별 평균농도 추이와 다소 다른 경향을 보이나 10 분위수 라돈 농도는 평균과 유사한 변화를 나타내었다. 이러한 결과는 라돈 농도가 상대적으로 높은 겨울철과 중국으로부터 토양입자 유입이 많은 봄철의 계절적 영향인 것으로 추정된다.

연구 기간의 계절별 평균농도는 겨울철에 3,041 mBq m⁻³로 가장 높았고, 다음으로 가을 3,004 mBq m⁻³, 봄 2,190 mBq m⁻³, 여름 2,064 mBq m⁻³ 순으로 높았다(그림 5). 이처럼 계절별 라돈농도가 차이가 나는 이유는 북서계열 풍향이 주류를 이루는 가을과 겨울철에 대기가 대륙의 영향을 많이 받고, 반대로 남동 계절풍의 영향으로 해양으로부터 공기가 이동하여 여름철에 농도가 낮은 원인으로 보인다. 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 더 높은 농도

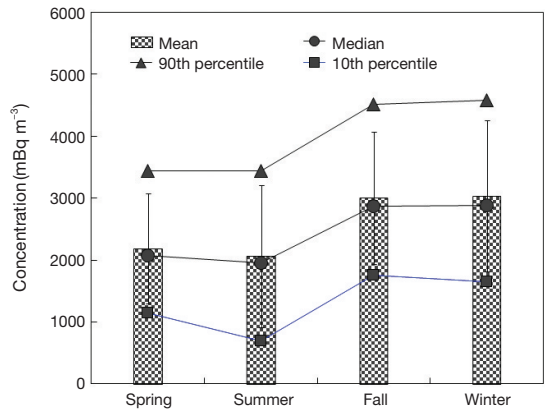


Fig. 5. Seasonal comparison of the radon concentrations at Gosan site.

를 유지하고 봄과 여름이 낮은 농도를 유지하는 것으로 추정된다.

3.2.2 일간 농도 변화

연구 기간의 라돈 농도 일간 변화를 비교하였고, 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림의 결과와 같이 라돈은 오전 7시에 2,819 mBq m⁻³로 하루 중 가장 높은 농도를 보였고, 오후 3시경에 2,069 mBq m⁻³로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 라돈 농도의 일간 변화 패턴을 비교해보면, 라돈은 아침 시간부터 서서히 농도가 낮아지기 시작하여 오후 3시경까지 감소하였고 다시 저녁 시간에 농도가 상승하여 밤에 점차로 농도가 높아지는 추세를 보였다. 이러한 일간 변화 패턴은 이탈리아 L'Aquila 지역의 시간별 라돈농도의 변화와 유사한 것으로 나타났다(Pitari *et al.*, 2014). 일간 변화는 대기 혼합고(mixing depth)의 변동에 기인하는 것으로 추측되며, 이때 혼합고 높이는 날씨가 맑을 때에는 늦은 오전이나 오후의 낮 동안에 가장 높아 대기 경계층까지 이르게 되고 이 높이 이내의 대기오염물은 난류에 의해 균일하게 연직분포를 이루게 된다. 따라서 이때의 혼합고는 해당 혼합고 높이와 같아지게 된다. 그러나 밤이나 이른 아침에는 지표 가까이 안정된 복사역전층이 형성되며, 이 경우 연직혼합이 일어나지 않게되어 해당 혼합고 높이는 역전층의 높이보다 낮아지게 된다(Kim *et al.*, 1985). 따라서 주간에는 혼합고가 최대로 확장되어 라돈이 확산되기 때문에 낮은 농도를 보인다. 반면에 야간에는 혼합고가 낮아져서 그만큼 라돈

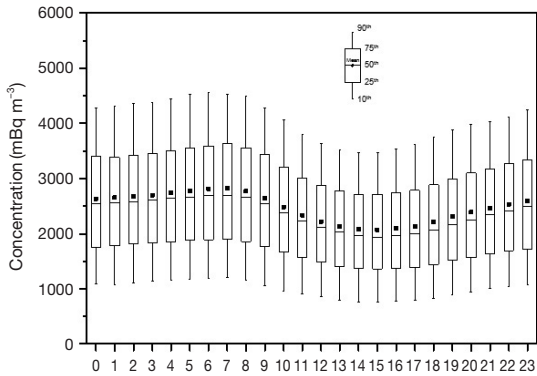


Fig. 6. Variation of the diurnal radon concentrations at Gosan site during the study period.

이 농집되어 높은 농도를 보이는 것으로 추정된다. 이처럼 일간 라돈농도는 월, 계절 변화와 마찬가지로 혼합고의 확장 및 축소에 따라 라돈이 확산되거나 압축되면서 농도 변화를 일으키고 있는 것으로 판단된다.

또한 라돈의 일간 농도변화를 계절별로 비교하였고, 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 계절별로는 겨울철에 라돈의 최대, 최소 농도가 큰 차이를 보이지 않지만 여름에는 겨울에 비해 훨씬 더 큰 차이를 보이고 있다. 겨울철에는 주야간 온도변화가 큰 차이를 보이지 않고 대기 혼합고의 차이도 상대적으로 적다. 따라서 라돈의 일간 최대, 최소 농도가 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 이와 반대로 주야간 온도차가 큰 편차를 보이는 여름철에는 혼합고의 확장 및 축소가 큰 변화를 보인다. 따라서 여름철에는 라돈의 최대, 최소 농도가 겨울에 비해 더 큰 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있다 (Chambers *et al.*, 2016).

3.3 기류 유입경로별 농도 변화

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.

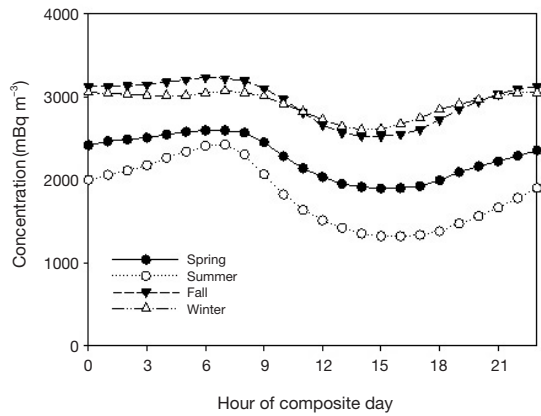


Fig. 7. Seasonal breakdown of the diurnal radon cycles at Gosan site expressed as mean hourly values for the 8-year composite.

특히 라돈은 대기 중에서 NO_x, SO₂, CO, O₃ 등과 수명이 비슷하고 에어로졸의 대기 체류시간과도 유사한 수명을 보인다. 따라서 이들 대기오염물질의 대기 중에서의 이동경로를 파악하기 위한 추적자로 활용이 가능하다 (Zoran *et al.*, 2013; Zahorowski *et al.*, 2004).

본 연구에서는 역궤적 분석을 통하여 라돈의 장거리 이동 경로를 추적하였다. 2008년 1월부터 2015년 12월 까지 라돈 측정 시기의 기류 이동 궤적을 역궤적 분석을 실시하여 추적하였다. 미국 NOAA HYSPLIT4 모델과 NCEP의 GDAS 기상 데이터를 이용하여 36시간으로 모사한 역궤적 군집분석 결과를 그림 8에 나타내었다. 역궤적 군집분석 결과를 기초로 제주도 고산지역으로 이동한 기류의 유입경로를 크게 3개의 군집으로 분류하였다. 그리고 각 군집별로 제주도 주변지역을 Cluster 1 (중국대륙), Cluster 2 (한반도), Cluster 3 (북태평양)으로 분류하여 제주로 유입되는 기류의 이동경로를 조사하였다. 이렇게 구분한 Cluster 1, Cluster 2, Cluster 3의 빈도는 각각 47.5% (1211회), 37.3% (953회), 15.2% (388회)이었다. 이처럼 2008~2015년 연구기간의 총 2552일 측정일수 중에는 대체적으로 중국대륙에서 제주지역으로 이동한 기류 유입이 가장 많았고, 다음으로는 한반도에서 이동한 기류 유입이 우세한 경향을 보였다.

역궤적 군집분석에 기초하여 3개 군집별 일평균 라돈농도를 표 2에 요약하였다. 표의 결과와 같이 라돈은

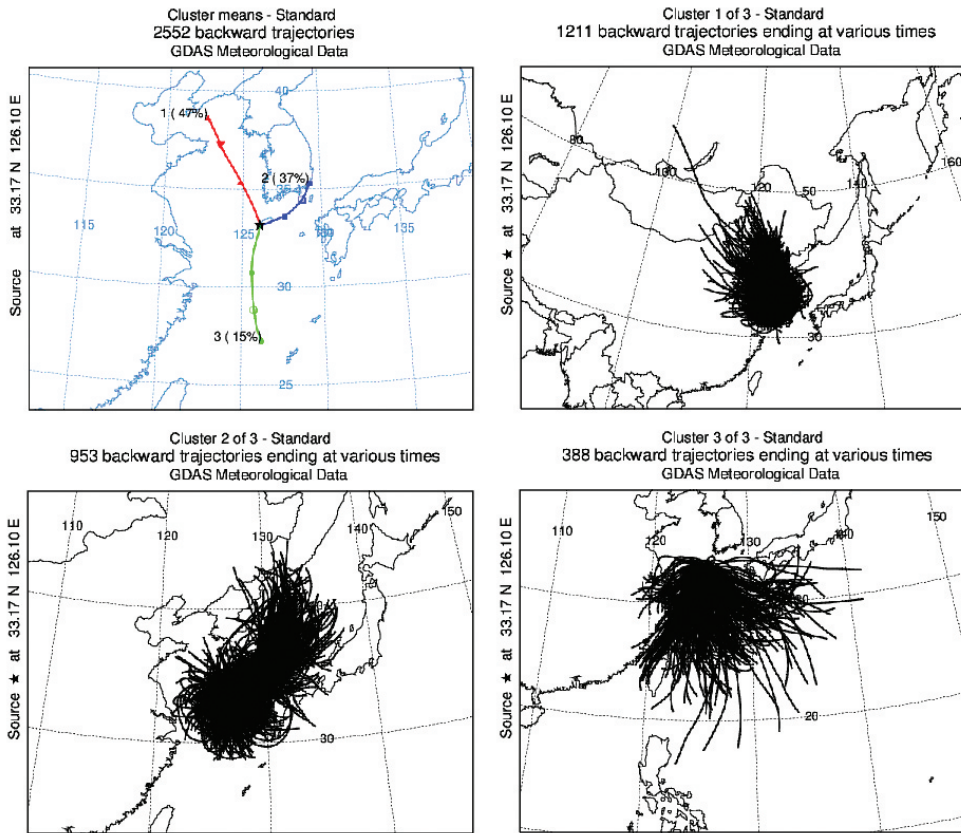


Fig. 8. Cluster back-trajectories of air masses corresponding to radon monitoring data at Gosan site during 2008 ~ 2015.

Table 2. Statistics of radon concentrations corresponding to cluster back-trajectories.

Pathway	Concentration, mBq m ⁻³			
	Mean	Median	10th	90th
Cluster 1 (n=1211)	2,808	2,681	1,741	3,993
Cluster 2 (n=953)	2,408	2,327	1,320	3,521
Cluster 3 (n=388)	1,494	1,295	317	2,874

Cluster 1 > Cluster 2 > Cluster 3 순으로 기류가 중국대륙에서 제주지역으로 이동할 때 라돈 농도가 가장 높고, 다음으로는 한반도에서 기류가 유입되었을 때 다음으로 높은 경향을 보였다. 반면에 북태평양에서 기류가 이동했을 때에는 대륙에서 공기가 유입되었을 때에 비해 훨씬 낮은 농도를 나타내는 것으로 확인되었다.

3.4 라돈과 PM₁₀ 농도 상관성

대기 라돈과 PM₁₀ 농도와와의 상관성을 확인하기 위하여 라돈을 기준으로 농도가 높은 상위 25%, 중간 50%, 하위 25%로 구분하여 각각의 평균농도를 비교하였다. 그리고 라돈 측정과 일치하는 시기의 PM₁₀ 질량농도의 평균을 상호 비교하여 표 3에 나타내었다. 이때 PM₁₀ 질량농도는 기상청이 고산측정소에서 β-ray 흡수법으로 측정한 PM₁₀ 자동측정망 데이터를 이용하였다.

표 3에서와 같이 상위 25%의 라돈(n=683) 농도는 3,800 mBq m⁻³이었고, 이와 동일한 시기의 PM₁₀ 질량농도는 41 μg m⁻³를 나타내었다. 반면에 중간 50%의 라돈(n=1367) 농도는 2,443 mBq m⁻³, 하위 25%(n=683)는 1,220 mBq m⁻³이었고, 이와 일치하는 시기의 PM₁₀ 질량농도는 각각 32, 25 μg m⁻³를 나타내었다. 연구기간의 일별 라돈 농도와 PM₁₀ 질량농도를 회귀분석

Table 3. PM₁₀ concentrations corresponding to high, medium, and low radon levels.

Concentration level	Radon (mBq m ⁻³)	PM ₁₀ (μg m ⁻³)
High (25%)	3,800	41
Medium (50%)	2,443	32
Low (25%)	1,220	25

으로 단순 비교한 상관계수(r)는 0.3 정도로 상관성이 그리 높지 않은 것으로 나타났다. 그러나 라돈 농도를 상위, 중간, 하위로 구분하여 이를 PM₁₀ 질량농도와 비교한 결과에서는 대체적으로 라돈 농도가 높을수록 비례적으로 PM₁₀ 농도도 함께 증가하는 동일 추세를 보이고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

제주도 고산지역에서 2008~2015년에 대기 라돈 농도를 실시간 모니터링한 결과로부터 라돈 배경농도와 시계열 변화 특성을 조사하였다. 라돈의 평균농도는 2,480 mBq m⁻³로 제주지역 실내 평균농도에 비해 36배로 매우 낮은 수준을 보였고, 계절별로는 겨울과 가을철에 높고 여름철에 상대적으로 낮은 경향을 보였다. 월별로는 10월에 가장 높고, 7월에 가장 낮았으며 대략 2.3배의 차이를 보였다. 일간 변화는 오전 7시경에 2,819 mBq m⁻³로 가장 높고, 오후 3시경에 2,069 mBq m⁻³로 낮은 농도를 보여 대기 혼합고에 따라 차이를 보이는 것으로 조사되었다. 역계적 군집분석법으로 라돈의 유입경로를 조사해 본 결과 기류가 중국대륙에서 제주지역으로 유입되었을 때 가장 높고, 다음으로 한반도에서 제주로 유입되었을 때 높은 농도를 나타내었다. 반면에 기류가 북태평양으로부터 유입되었을 때는 상대적으로 훨씬 낮은 농도를 나타내어 대륙의 영향을 많이 받고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 라돈과 PM₁₀ 상관성 조사결과 대체적으로 라돈 농도가 높을수록 PM₁₀ 농도가 증가하는 상관성을 나타내었고, 라돈을 대기오염물질 장거리 수송 추적자로 활용할 수 있을 것으로 추정된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책

지원 강화사업(KMIPA 2015-2050)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Almeida, R.M., D.C. Lauria, A.C. Ferreira, and O. Sracek (2004) Groundwater radon, radium and uranium concentrations in Região dos Lagos, Rio de Janeiro State, Brazil, *Journal of Environmental Radioactivity*, 73(3), 323-334.
- 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, *Applied Geochemistry*, 23(10), 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(2), 271-279.
- Chambers, S.D., W. Zahorowski, A.G. Williams, J. Crawford, and A.D. Griffiths (2013) Identifying tropospheric baseline air masses at Mauna Loa Observatory between 2004 and 2010 using Radon-222 and back trajectories, *Journal of Geophysical Research*, 118, 1-13, doi:10.1029/2012JD018212.
- Chambers, S.D., C.H. Kang, A.G. Williams, J. Crawford, A.D. Griffiths, K.H. Kim, and W.H. Kim (2016) Improving the representation of cross-boundary transport of anthropogenic pollution in Southeast Asia using Radon-222, *Aerosol and Air Quality Research*, 16(4), 958-976, doi: 10.4209/aaqr.2015.08.0522.
- 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, *Journal of Environmental Toxicology*, 24(3), 203-211. (in Korean)
- 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.
- Draxler, R.R. and G.D. Rolph (2013) HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php).

- Jamil, K., K.K. Al-Ahmady, Fazal-ur-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.
- Kang, C.H., W.H. Kim, C.G. Hu, and D.H. Kang (2012) Real-time monitoring of radon background level at Gosan site, Jeju Island, *Journal of Analytical Science & Technology*, 25(1), 7-13. (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, W.H., H.J. Ko, C.G. Hu, H. Lee, C. Lee, S. Chambers, A.G. Williams, and C.H. Kang (2014) Background Level of Atmospheric Radon-222 Concentrations at Gosan Station, Jeju Island, Korea in 2011, *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 35(4), 1149-1153.
- Kim, Y.S., C.M. Lee, K.Y. Kim, H.J. Jeon, J.C. Kim, and T. 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, *Korean Journal of Environmental Health Sciences*, 33(4), 283-292.
- Ko, H.J., S.H. Sin, C.G. Hu, W.H. Kim, C.H. Kang, D.H. Kang, and S. Chambers (2013) Time-series Variation of Atmospheric Radon Concentrations at Gosan Site, Jeju Island, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(1), 86-96. (in Korean)
- Lee, K., S. Seo, J. Yoo, S. Oh, M. Kwon, and W. Lee (2016) Factors influencing indoor radon concentration in detached house, *Journal of Odor Indoor Environment*, 15(2), 93-99. (in Korean)
- 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. Gueumjeong in Busan, Korea, *Jour. Petrol. Soc. Korea*, 18(4), 279-291.
- Pitari, G., E. Coppari, N. De Luca, and P. Di Carlo (2014) Observations and box model analysis of radon-222 in the atmospheric surface layer at L'Aquila, Italy: March 2009 case study, *Environmental Earth Sciences*, 71(5), 2353-2359.
- 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.
- 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), 16,743-16,751.
- WMO/GAW (2001) Global Atmosphere Watch Measurements Guide (No. 143), WMO TD No. 1073.
- WMO/GAW (2004) 1st International Expert Meeting on Sources and Measurements of Natural Radionuclides Applied to Climate and Air Quality Studies (No. 155), WMO TD No. 1201.
- 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.
- 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.
- Zoran, M.A., M.R. Dida, A.T. Zoran, L.F. Zoran, and A. Dida (2013) Outdoor ²²²Radon concentrations monitoring in relation with particulate matter levels and possible health effects, *Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry*, 296(3), 1179-1192.