

## 제주도 고산지역의 라돈 배경농도 실시간 모니터링

강창희\* · 김원형 · 허철구<sup>1</sup> · 강동훈<sup>2</sup>

제주대학교 화학과, <sup>1</sup>제주대학교 환경공학과, <sup>2</sup>기상청 기후변화감시센터  
(2011. 12. 19. 접수, 2011. 12. 28. 수정, 2011. 12. 28. 승인)

### Real-time monitoring of radon background level at Gosan site, Jeju Island

Chang-Hee Kang<sup>\*</sup>, Won-Hyung Kim, Chul-Goo Hu<sup>1</sup> and Dong-Hun Kang<sup>2</sup>

*Department of Chemistry, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea*

<sup>1</sup>*Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea*

<sup>2</sup>*Korea Global Atmospheric Watch Center, Korea Meteorological Administration, Jeju 695-941, Korea*

(Received December 19, 2011; Revised December 28; Accepted December 28, 2011)

**요 약:** 제주도 고산지역에서 라돈(<sup>222</sup>Rn)을 실시간 모니터링하여 대기 중의 배경농도 수준을 확인하였다. 고산지역의 라돈 농도는 평균 2831 mBq/m<sup>3</sup> (0.077 pCi/L)로 우리나라 실내 평균농도보다는 19.5배 낮은 배경농도 수준을 나타내었다. 계절별로는 봄, 여름, 가을, 겨울에 각각 2657, 2071, 3249, 3384 mBq/m<sup>3</sup> 농도를 보여 겨울에 높고 여름에 낮은 것으로 조사되었다. 월별로는 10월에 가장 높고 7월에 가장 낮은 농도를 나타내었다. 일간 농도는 오전 7시에 하루 중 가장 높은 농도를 보였고, 오후 2~3시경에 가장 낮은 농도를 나타내는 것으로 확인되었다. 역궤적 분석 결과, 라돈 농도는 기류의 유입경로에 따라 차이를 보였고, 아시아대륙으로부터 제주도로 이동했을 때 농도가 높고 북태평양으로부터 기류가 유입될 때 훨씬 더 낮은 농도를 나타내었다.

**Abstract:** The real-time monitoring of radon (<sup>222</sup>Rn) concentrations has been carried out to evaluate the background concentration level of atmospheric radon in Gosan site, Jeju Island. The mean concentration of radon for the recent 10 years was 2831 mBq/m<sup>3</sup> (0.077 pCi/L), which was 19.5 time lower than that of indoor radon in Korea. The seasonal concentrations were 2657, 2071, 3249, 3384 mBq/m<sup>3</sup> respectively for spring, summer, fall, and winter seasons. In monthly comparison, the radon concentrations were high in October and low in July. The hourly concentrations have increased during the nighttime, showing 3666 mBq/m<sup>3</sup> at 7 a.m., and decreased relatively during the daytime, showing 2755 mBq/m<sup>3</sup> at 2~3 p.m. From the back trajectory analysis, the radon concentrations showed higher values when the air mass was moved from the Asia continent to Jeju area, on the other hand, it showed low values when it was moved from the North Pacific Ocean.

**Key words:** radon, background level, backward trajectory, air mass, Gosan site, Jeju Island

★ Corresponding author

Phone : +82-(0)64-754-3545 Fax : +82-(0)64-756-3561

E-mail : changhee@jejunu.ac.kr

## 1. 서 론

라돈은 자연계에 널리 분포하는 대표적인 자연 방사성 물질이다. 지각의 암석이나 토양 중에 함유된 우라늄, 토륨과 같은 원소들은 몇 단계의 붕괴 과정을 거쳐 라돈을 생성한다. 자연계의 주요 라돈 동위원소는  $^{222}\text{Rn}$ (radon),  $^{220}\text{Rn}$ (thoron),  $^{219}\text{Rn}$ (actinon)의 세 가지이며, 이 중  $^{222}\text{Rn}$ 에 의한 피해가 가장 큰 것으로 나타나고 있다. 이들은 다른 물질과 화학적으로 반응을 일으키지 않으나 방사선을 방출하는 성질 때문에 물리적으로는 매우 불안정하다.  $^{220}\text{Rn}$ 은 토륨( $^{232}\text{Th}$ )의 붕괴에 의해 중간체인  $^{224}\text{Ra}$ 를 거쳐 생성되며 반감기가 54.5초로 매우 짧다.  $^{219}\text{Rn}$ 은 우라늄( $^{235}\text{U}$ )의 붕괴 생성물로  $^{223}\text{Ra}$ 를 거쳐 생성되며, 반감기가 3.9초로 아주 짧아서 대기 중에서의 농도는 낮다. 그러나  $^{222}\text{Rn}$ 은 앞의 두 동위원소에 비해 훨씬 긴 반감기를 나타낸다.<sup>1</sup> 그리고 라돈 방사성 동위원소 중에서 가장 널리 분포하며, 자연 방사선 중에서 가장 큰 부분을 차지한다.

라돈은 지각물질로부터 발생되기 때문에 주로 지하 공간에서 높은 농도를 보이고 지하수와 대기 중에서도 미량으로 검출된다. 또한 화학적으로 불활성인 기체 물질이기 때문에 반응성이 거의 없고, 넓게 확산되는 이동 특성을 나타낸다. 그리고 공기보다 9배나 무거워서 지표면에 가까울수록 더 높은 농도를 보이기 때문에 용이하게 인체로 흡입되어 폐암을 유발하는 위해성을 나타낸다.<sup>2,3</sup>

선진국에서는 1980년대부터 정부 주도로 라돈지도 작성과 실내의 라돈 조치기준을 설정하여 체계적으로 라돈 관리대책을 시행해오고 있다. 미국은 환경보호국과 주정부에 의해 1980년부터 실내라돈 조사를 실시하였고, 실내라돈 조치기준을 4 pCi/L, 수질 대체기준을 4,000 pCi/L로 설정하였다. 영국의 경우 지질조사소(BGS, British Geological Survey)와 방사선방호위원회(NRPB, National Radiological Protection Board)를 중심으로 1980년부터 현재까지 지속적으로 실내라돈 조사가 수행되고 있다. 그리고 실내라돈 조치기준을 5.4 pCi/L (200 Bq/m<sup>3</sup>)로 정하여 고농도 지역에 위치한 건물의 경우 정부가 라돈 측정을 권고하고 있다. 스웨덴의 경우 실내라돈농도 관리기준을 기존주택은 10.8 pCi/L (400 Bq/m<sup>3</sup>), 신규주택은 5.4 pCi/L (200 Bq/m<sup>3</sup>)로 설정하여 관리하고 있다. 또 토양가스의 라돈농도가 270 pCi/L 이상일 때는 라돈방어기준(radon protection level)을 적용하고, 1,350 pCi/L 이상

일 때는 라돈안전기준(radon safety level)을 적용하고 있다. 체코와 독일 역시 2000년 이후 실내 라돈조사가 수행되었고 토양가스 라돈지도 및 실내 라돈지도를 작성하였다. 그리고 실내라돈기준을 5.4 pCi/L (200 Bq/m<sup>3</sup>)로 설정하여 관리하고 있다. 일본의 경우 국립방사선의학연구소(NIRS, National Institute of Radiological Sciences)와 일본화학분석센터(JCAC, Japan Chemical Analysis Center)를 중심으로 1994년~1996년에 실내조사가 수행되었다. 그리고 2004년 이후에는 고농도 가옥에 대한 집중조사와 각 현별 연간 2,000개 가옥에 대한 조사를 실시하고 있다.<sup>4,5</sup>

우리나라의 경우 1988년에 한국원자력안전기술연구원에서, 1992년부터 1995년까지 국립보건원에서 실내라돈조사를 수행하였다. 또 2000년대에는 한국원자력안전기술연구원이 실내공간 조사를 실시하였다. 최근 들어 환경부는 지하역사·지하도 상가 등 17개 다중이용시설군과 학교(지하교실)에 대하여 실내 라돈 권고기준(4 pCi/L)을 설정하여 운영하고 있으며, '지하철역 공기질 개선대책(2007년 7월)'을 수립하였다. 또한 환경부는 2007년 8월에 라돈종합관리대책을 발표하였다. 그리고 2012년까지 라돈에 안전한 실내환경 조성을 위한 라돈측정기반 구축, 노출현황파악, 노출경로관리 등 종합적이고 단계적인 대책추진을 목표로 하고 있다. 2010년 환경부에서 발간한 실내라돈 가이드라인은 미국 환경보호국의 라돈관련 홍보물을 참조하여 제작되었으며, 국가라돈정보센터(www.radon.or.kr) 및 홍보동영상을 제작하여 대국민 홍보를 적극 추진하고 있다.<sup>6</sup> 현재 환경부는 2008년부터 추진해온 전국라돈지도 작성사업을 2013년까지 완료하여 라돈관리의 과학적 토대를 구축하는 한편, 국내 최초로 실내라돈 저감사업을 실시하여 다양한 유형의 표준시공모형을 제시할 예정이다.<sup>3,5</sup>

현재 국내 라돈 관리 및 감시는 주로 실내나 지하 공간을 대상으로 이루어지고 있으며, 아직까지 대기 중의 극미량 라돈을 모니터링하고 감시하기 위한 연구는 거의 이루어지지 못하고 있다. 라돈 관리를 위해서는 대기 중의 라돈농도 수준 파악이 필요하고, 대기 배경농도(background level)를 평가하기 위한 데이터의 확보가 이루어져야 한다. 특히 아시아대륙의 편서풍 풍하 측에 위치한 한반도의 경우 대륙에서 발생하여 기류를 타고 장거리 이동하는 각종 오염물질의 영향을 크게 받고 있다. 라돈 역시 이러한 대륙의 영향을 많이 받고 있다. 더욱이 라돈은 안정하고 빗물에도 용해되지 않기 때문에 장거리 이동이 용이하고, 이를 대

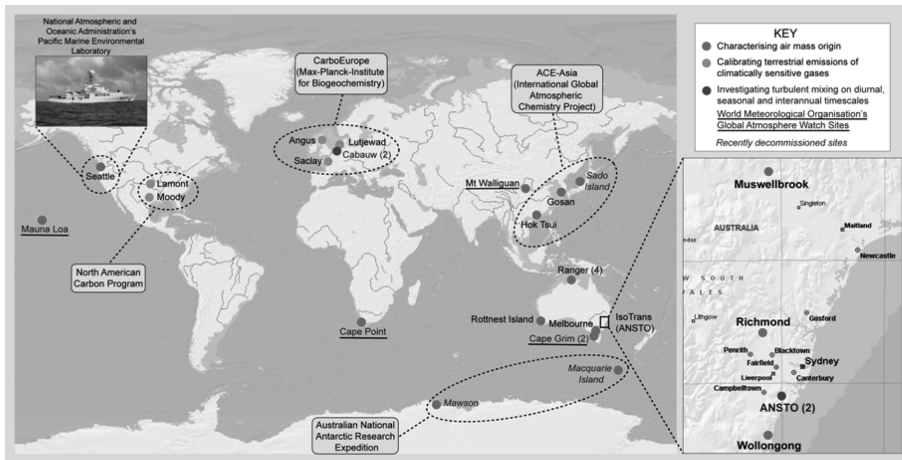


Fig. 1. ANSTO Radon Detector System for the Global Atmosphere Watch Network.

록 기단의 이동, NO<sub>2</sub>를 비롯한 일부 가스상 오염물질의 장거리 수송 추적자(tracer)로도 활용할 수 있다.<sup>7-8</sup> 이처럼 대기 중의 라돈은 그 자체의 관리, 감시는 물론 대기오염물질, 온실가스 등의 발생기원 추적을 위해서도 지속적인 모니터링을 필요로 한다.

대기 중의 라돈은 실내용 지하 공간에 비해 훨씬 낮은 농도를 측정해야 하기 때문에 고감도의 검출기를 필요로 한다. 호주핵과학기술기구(ANSTO, Australian Nuclear Science and Technology Organisation)에서는 이러한 고감도 라돈검출기를 자체적으로 설계, 제작하고 있다. 그리고 WMO(World Meteorological Organization)와 GAW(Global Atmosphere Watch) 관측소를 중심으로 세계적인 라돈 측정망을 구축하여 운영하고 있다.<sup>7,9</sup> 국내에서는 2001년에 호주핵과학기술기구에서 제작한 라돈검출기를 처음으로 제주도 고산 관측소에 설치하여 대기 중의 농도를 측정하기 시작하였다. 그리고 2011년에는 제주대학교와 기상청 기후변화감시센터가 공동으로 라돈 배경농도를 실시간으로 측정하고 있다. 이러한 라돈 배경농도 측정은 국내에서는 아직 연구가 미진한 대기 중의 라돈을 지속적으로 측정함으로써 농도변화를 감시하고, 또 라돈을 대기오염물질과 온실가스의 수송 추적자 활용하는데 그 목적이 있다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 제주도 고산관측소

제주도는 한반도와 100 km, 중국과 500 km, 일본과 250 km 이상 떨어져 있고 중국과 일본의 중앙에 위치하고 있다. 그리고 인구밀도가 낮고 국지 오염원

의 방해가 적은 청정지역이기 때문에 동북아시아에서 장거리 이동하는 대기오염물질의 영향을 측정하기에 아주 적합한 조건을 갖추고 있다. 특히 본 연구를 수행한 고산지역은 제주도 서쪽 끝 지점에 위치한 청정 지역으로 아시아대륙에서 편서풍을 타고 이동하는 대기오염물질의 영향을 평가하기에 적합한 조건을 갖추고 있다. 고산관측소 현장은 제주도 제주시 한경면 고산리 소재 수월봉(33°17'N, 126°10'E)에 설치하였으며, 제주도 서쪽 끝 지점의 제주 고층레이더기상대로부터

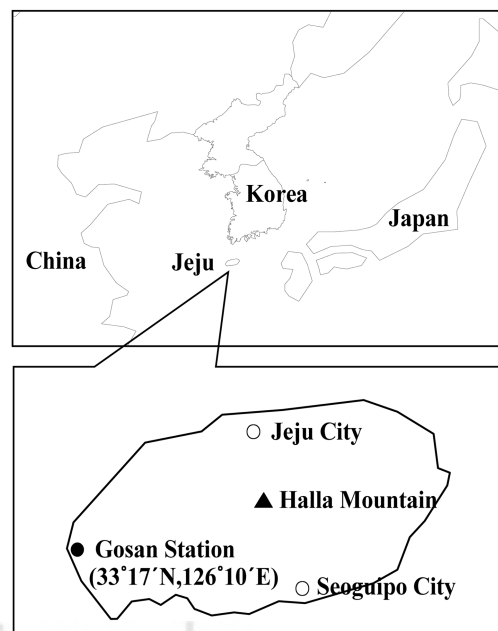


Fig. 2. Location of Gosan site, Jeju Island.

서쪽 방향으로 약 300 m 떨어진 해발 72 m의 언덕위에 위치하고 있다(Fig. 2).

## 2.2. 라돈 모니터링

고산관측소에서의 라돈 모니터링은 ACE(Aerosol Characterization Experiment)-Asia 프로그램의 일환으로 2001년부터 측정을 시작하여 2011년 현재까지 10년 이상 측정을 지속해오고 있다. 그리고 2011년부터는 제주대학교와 기상청 기후변화감시센터(고산기후변화감시소)가 공동으로 라돈 농도를 실시간으로 측정하고 있다. 고산관측소의 라돈 모니터링은 ANSTO의 고감도 라돈검출기(Model D700, LLD=90 mBq/m<sup>3</sup>, Sensitivity=0.21counts sec<sup>-1</sup>/Bq m<sup>-3</sup>)를 사용하여 2001년 1월부터 2007년 7월까지 30분 간격, 실시간으로 이루어졌다. 그리고 2007년 7월에는 더 고감도의 라돈검출기(Model D1500, LLD=25 mBq/m<sup>3</sup>, Sensitivity=0.28~0.29 counts sec<sup>-1</sup>/Bq m<sup>-3</sup>)를 설치하여 현재 지속적으로 측정 중에 있다(Fig. 3). 사용 중인 라돈 검출기는 섬광셀검출(Scintillation cell) 형으로 ANSTO에서 자체적으로 설계, 제작한 제품이다.<sup>1,7-8</sup>

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 배경지역 라돈 모니터링

호주핵과학기술기구에서는 대기 중의 극미량 라돈을 측정하기 위하여 자체적으로 설계, 제작한 고감도 라돈검출기를 세계 유망관측소에 설치하여 라돈측정 네트워크를 구축하고 있다. 측정망은 국제적으로 지명도가 높은 주요 GAW와 WMO 관측소를 중심으로 세

계 20여 배경 관측소에서 대기 라돈을 실시간으로 모니터링하고 있다(Fig. 1).

주요 관측소는 호주의 Cape Grim, 하와이의 Mauna Loa, 남아프리카공화국의 Cape Point, 스코틀랜드의 Angus, 일본의 Sado Island, 미국의 Seattle, 홍콩의 Hok Tsui 등을 포함하여 20여 곳이다.<sup>7</sup> 이 중 호주 타즈메니아의 Cape Grim 관측소(40°41'S, 144°41'E, 94 m)는 대표적인 전지구급 관측소로 CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization)와 호주 기상청이 공동으로 설립하여 운영하고 있다. ANSTO에서는 이 관측소에 고감도 라돈검출기(Model D5000, LLD=10 mBq m<sup>-3</sup>, Sensitivity=0.7 counts s<sup>-1</sup>/mBq m<sup>-3</sup>)를 설치하여 라돈 배경농도를 실시간으로 측정하고 있다.

### 3.2. 제주도 고산지역 라돈 모니터링

국내에서의 라돈 측정은 주로 실내 및 지하 공간에 집중되고 있고, 대기 중 라돈의 측정 및 감시는 아직 체계적으로 이루어지지 못하고 있다. 국내에서 대기 라돈 모니터링은 유일하게 제주도 고산관측소에서만 장기적으로 이루어지고 있다. 이러한 라돈 측정은 국내 배경지역의 대기 중 라돈 수준을 확인하고 이를 감시하는데 그 목적이 있다. 그리고 라돈이 주요 대기 오염물질과 비슷한 수명을 나타내며, 물에 용해되지 않고 화학적으로 매우 안정하기 때문에 에어러솔이나 가스상 오염물질의 장거리 이동, 수송 특성을 파악하기 위한 추적자(tracer)로 활용이 가능하다. 그리고 라돈을 추적자로 대륙 기단의 fetch 분석, 일부 온실기체의 장거리 이동 및 플럭스 규명 등의 연구를 위한 활



Fig. 3. High sensitivity radon detector system installed at Gosan station of Jeju Island.

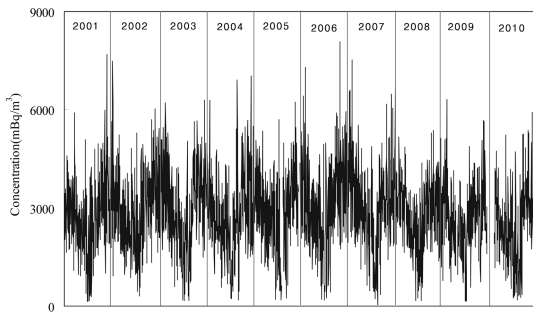


Fig. 4. Variation of day-averaged radon concentrations at Gosan site, Jeju Island between January 2001 and December 2010.

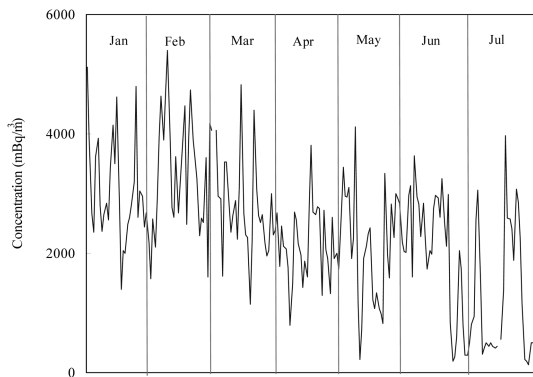


Fig. 5. Variation of day-averaged radon concentrations at Gosan site, Jeju Island between January and July, 2011.

용을 모색 중에 있다.<sup>7,9-11</sup>

2001년부터 2010년까지 10년간 측정된 제주도 고산 지역 라돈농도의 시계열변화를 Fig. 4에 나타내었다. 2011년부터 1월부터 7월까지 측정된 일평균 라돈농도의 시계열변화를 Fig. 5에 나타내었다. 또한 10년간의 계절별, 월별, 시간별 라돈 농도를 Fig. 6~Fig. 8에 비교하였다. 고산지역의 10년 평균농도는 약 2831 mBq/m<sup>3</sup>(0.077 pCi/L)의 수준을 나타내었다. 이것은 우리나라 실내 평균농도인 1.5 pCi/L에 비해 19.5배 정도 낮은 값으로 국내 배경농도 수준을 보이고 있다.<sup>3,12</sup> 이 값을 외국의 청정지역인 홍콩 Hok Tsui의 5,065 mBq/m<sup>3</sup>, 하와이 Mauna Loa의 146 mBq/m<sup>3</sup>와 비교해 보면, Hok Tsui보다는 1.8배 정도 낮으나 Mauna Loa보다는 19.4배 정도 높은 수준이다.<sup>8</sup> 그러나 Mauna Loa 관측소의 경우, 고도가 3,397 m에 달하고 대륙으로부터 멀리 떨어진 청정지역에 위치하고 있기 때문에 고산 측정소와 단순히 농도만을 비교하기는 어려운 조건이다. 또 측정기간의 라돈 농도를 계절별로 비교해 본 결과(Fig. 6), 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 2,657,

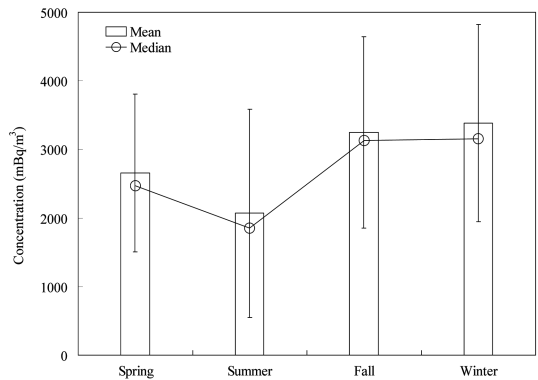


Fig. 6. Seasonal comparison of radon concentrations at Gosan site, Jeju Island between 2001 and 2010.

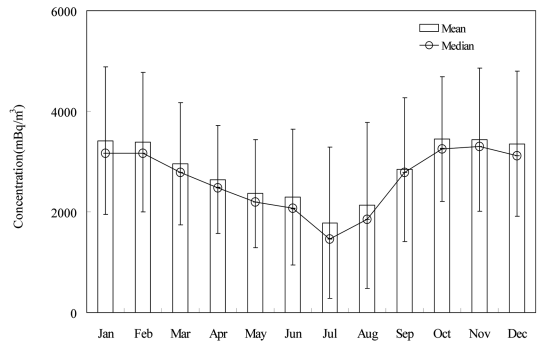


Fig. 7. Monthly comparison of radon concentrations at Gosan site, Jeju Island between 2001 and 2010.

2,071, 3,249, 3,384 mBq/m<sup>3</sup>로 겨울에 가장 높고, 다음으로 가을, 봄 순이었으며, 여름에 가장 낮은 농도를 나타내었다. Fig. 7에서 보듯이 월별 농도 Oct > Nov > Jan > Feb > Dec > Mar > Sep > Apr > May > Jun > Aug > Jul 순으로 높은 농도를 보였다. 특히 10월에 3,450 mBq/m<sup>3</sup>로 가장 높은 반면 7월에 1,782 mBq/m<sup>3</sup>로 가장 낮은 것으로 조사되었다.

일간 라돈 농도를 시간별로 비교해 본 결과, Fig. 8과 같이 오전 7시에 3,666 mBq/m<sup>3</sup>로 하루 중 가장 높은 농도를 보였고, 오후 2~3시경에 2,755 mBq/m<sup>3</sup>로 가장 낮은 농도를 보였다. 그리고 전체적으로는 대체로 야간에 높고 낮 시간에 낮은 농도를 나타내는 것으로 확인되었다. 그 경향을 보면 아침 시간부터 서서히 농도가 낮아지기 시작하여 오후 2시경까지 감소하다가 다시 저녁시간에 농도가 상승하기 시작하여 밤이 되면 점차로 농도가 상승하는 추세를 보인다. 이러한 결과는 야간에 차가워진 공기가 낮 시간의 기온 상승으로 지표면의 공기가 이동하면서 대기 혼합고가

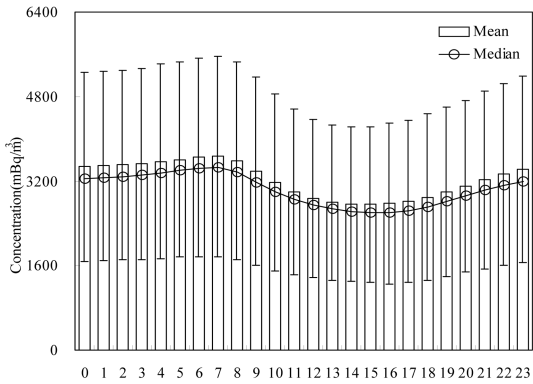


Fig. 8. Hourly comparison of radon concentrations at Gosan site, Jeju Island between 2001 and 2010.

높아진 이유로 추정된다.<sup>13-14</sup> 또한 Fig. 5의 결과와 같이 2011년 1~7월의 라돈 농도는 평균 2,369 mBq/m<sup>3</sup>로 2001~2010년의 2,831 mBq/m<sup>3</sup>에 비해 다소 낮은 결과를 나타내었다. 또 월별 농도는 Feb > Jan > Mar > Apr > Jun > May > Jul 순으로 이전과 비슷한 경향을 보였다. 그러나 2011년의 경우 후반기 배경(background) 값을 포함하지 않은 결과이기 때문에 이를 포함하여 보정한 최종 농도는 다소 다른 경향을 보일 것으로 추정된다.

### 3.3. 기류 유입경로별 라돈농도 변화

대기 중의 라돈은 화학적으로 안정하고 기체상으로 존재하기 때문에 기류를 타고 멀리 이동할 수 있다. 또 발생기원이 지각물질이기 때문에 기류가 대륙에서 이동했을 때가 해양에 비해 훨씬 더 높은 농도를 나

타낸다. 그리고 NO<sub>2</sub>를 비롯한 몇몇 오염물질들과 대기 중에서의 수명이 비슷하기 때문에 오염물질의 이동경로를 확인하기 위한 추적자로 활용할 수도 있다.

본 연구에서는 2001년부터 2008년까지 측정 한 라돈 데이터를 이용하여 일평균 라돈 농도가 높은 상위 10%와 상대적으로 농도가 낮은 하위 10%에 대해 이 시기의 기류 이동을 조사하였다. 기류의 이동은 역궤적 분석을 실시하여 확인하였고, 역궤적 분석은 미국 해양대기국(NOAA)에서 제공하는 HYSPLIT4 모델을 이용하였다. 풍향과 풍속 자료 역시 NOAA의 북반구 FNL (FiNaL run at NCEP)과 GDAS (Global Data Assimilation System) 자료를 이용하였다. 이 때 출발점 고도는 850 mb면인 1,500 m로 설정하였고, 출발 시간은 해당 날짜의 매 00UTC로 하였다. 그리고 중국대륙에서 기류가 한반도로 이동하는 시간을 고려하여 역궤적 분석의 모사시간은 5일(120시간)로 설정하였다.<sup>15-16</sup>

이러한 역궤적 분석 결과, Fig. 9의 결과와 같이 라돈 농도가 높은 시기에는 대체적으로 기단이 대륙에서 제주지역으로 이동하였다. 그러나 라돈 농도가 낮은 시기에는 대부분 기단이 북태평양으로부터 제주지역으로 이동한 것으로 나타났다.

## 4. 요약 및 결론

제주도 고산지역에서 대기 중의 극미량 자연 방사성 라돈을 장기간에 걸쳐 측정하여 국내 배경농도 수준을 모니터링하였다. 고산지역의 라돈 농도는 평균 2,831 mBq/m<sup>3</sup>(0.077 pCi/L)로 홍콩의 Hok Tsui보다는

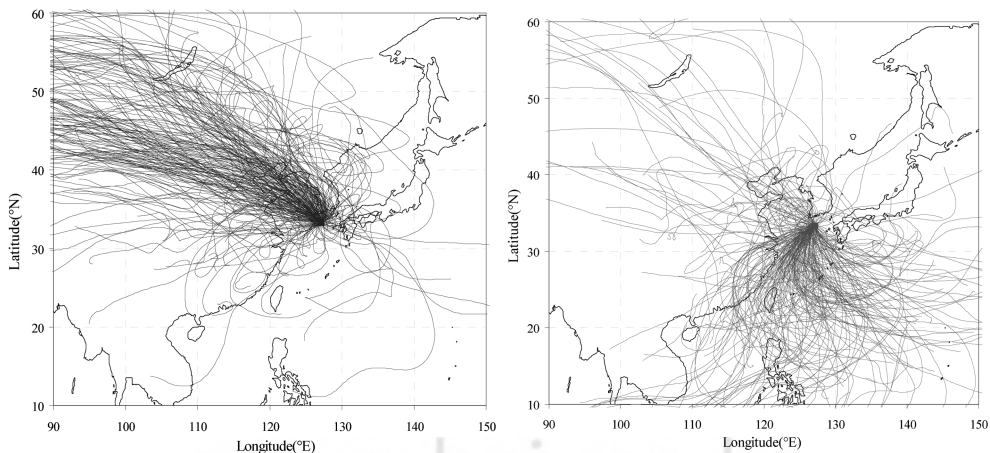


Fig. 9. Five-day backward trajectories corresponding to high (left) and lower (right) 10% of radon concentrations.

1.8배 정도 낮으나 하와이의 Mauna Loa보다는 19.4배 정도 높은 수준의 농도를 나타내었다. 또 우리나라 실내 평균농도보다 19.5배 낮은 배경농도 수준을 나타내었다. 계절별로는 봄, 여름, 가을, 겨울에 각각 2,657, 2,071, 3,249, 3,384 mBq/m<sup>3</sup>로 겨울에 가장 높은 농도를 나타내었다. 또 월별로는 10월에 가장 높고, 7월에 가장 낮은 농도를 나타내었고, 일간 농도는 오전 7시에 하루 중 가장 높은 농도를 보였고, 오후 2~3시경에 가장 낮은 농도를 나타내는 것으로 확인되었다. 역궤적분석 결과, 라돈농도는 공기의 유입 경로에 따라 뚜렷한 농도 차이를 보였으며, 아시아대륙으로부터 공기가 유입될 때 농도가 높고, 북태평양으로부터 제주지역으로 기류가 이동했을 때 훨씬 낮은 농도를 나타내었다.

### 감사의 글

이 연구는 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책 지원 강화사업 (RACS 2011-1015)의 지원으로 수행되었습니다. 그리고 제주도 고산관측소에서 기후변화감시센터 고산기후변화감시소와 공동으로 연구한 결과입니다.

### 참고문헌

1. S. Whittlestone and W. Zadorowski, *J. Geophys. Res.*, **103**(D13), 16,743-16,751 (1998).
2. National Institute of Environmental Research, *Investigation for Nationwide Actual Indoor Radon: Research Report of Public Facilities*, (2009. 10).
3. Ministry of Environment, *Comprehensive Countermeasures for Indoor Radon Control(2007~2012); Safe Maintenance of Indoor Environment from Radon*, (2007. 8).

4. US EPA, Assessment of radon risk in home (EPA 402-R-03-003) (2003).
5. H. K. Je, *J. Mineral and Energy Res.*, **47**(3), 400-405 (2010).
6. Radon Information Center, *What is Radon?/Radon Investigation* (www.radon.or.kr).
7. W. Zadorowski, S. D. Chambers and A. Henderson-Sellers, *J. Env. Radioact.*, **76**(1-2), 3-33 (2004).
8. W. Zadorowski, S. Chambers, T. Wang, C. H. Kang, I. Uno, S. Poon, S.N. Oh, S. Werczynski, J. Y. Kim and A. Henderson-Sellers, *Tellus B*, **57**(2), 124-140 (2005).
9. Y. Igarashi, Y. Sawa, K. Yoshioka, H. Matsueda, K. Fujii and Y. Dokiya, *J. Geophys. Res.*, **109**(D17304), 21pp (2004).
10. S. Biraud, P. Ciaia, M. Ramonet, P. Simmonds, V. Kazan, P. Monfray, S. O'Doherty, T. G. Spain and S. G. Jennings, *J. Geophys. Res.*, **105**(D1), 1351-1366 (2000).
11. S. R. Wilson, A. L. Dick, P. J. Fraser and S. Whittlestone *J. Atmos. Chem.*, **26**(2), 169-188 (1997).
12. S. Hirao, H. Yamazawa and J. Moriizumi, *J. Env. Radioact.*, **101**(11), 974-984 (2010).
13. Y. S. Kim, C. M. Lee, K. Y. Kim, H. J. Jeon, J. C. Kim, and T. Iida, *Kor. J. Env. Hlth.*, **33**(4), 283-292 (2007).
14. Y. S. Kim, C. M. Lee, H. T. Kim, H. S. Lee and T. S. Park, *Environmental and Occupational Medicine*, **9**(1), 49-53 (2000).
15. NOAA, Air Resources Laboratory, *HYSPLIT4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model, 2009 Silver Spring*(2009) ([http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT\\_info.php](http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT_info.php)).
16. H. J. Ko, C. H. Kang, W. H. Kim, S. B. Lee and H. S. Kang, *Korean J. Atmos. Env.*, **26**(4), 420-431 (2010).