



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



碩士學位論文

대기 라돈 모니터링 및 시계열
변동 특성: 2006~2008년 제주도
고산지역 측정

濟州大學校 大學院

化 學 科

申 丞 喜

2012年 2月



대기 라돈 모니터링 및 시계열
변동 특성: 2006~2008년 제주도
고산지역 측정

指導教授 姜 昌 禧

申 丞 喜

이 論文을 理學 碩士學位 論文으로 提出함

2012年 2月

申丞喜의 理學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ (印)

委 員 _____ (印)

委 員 _____ (印)

濟州大學校 大學院

2012年 2月



Monitoring and Time-series Variation of
Atmospheric Radon at Gosan site of Jeju
Island during 2006-2008

Seung Hee Sin

(Supervised by professor Chang Hee Kang)

A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirement for the degree of Master of Science

2012. 2.

This thesis has been examined and approved.

.....
.....
.....

.....
Date

Department of Chemistry
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
ABSTRACT	vii
I. 서 론	1
II. 실 험	4
1. 측정소 설비 및 측정기기	4
1) 측정소 설비	4
2) 측정기기	5
2. 라돈 농도 모니터링	8
3. 오염물질 농도 측정	8
1) 가스상 오염물질 농도 측정	8
2) PM ₁₀ 미세먼지 농도 측정	9
3) 측정 데이터의 수집	10
4. 역궤적 분석	10
III. 결과 및 고찰	12
1. 라돈의 발생 및 모니터링	12
1) 라돈의 발생	12
2) 라돈의 위해 및 관리	14
3) 라돈 검출 시스템	16
2. 라돈의 시계열 변화 특성	18
1) 대기 라돈 배경농도	18
2) 월별, 계절별 농도 비교	22
3) 시간별 농도 비교	26
3. 라돈의 유입경로	28

4. 대기오염물질의 배경농도 모니터링	34
1) 대기오염물질의 발생 및 이동	34
2) 대기오염물질의 배경농도 및 시계열 변화	36
5. 라돈과 대기오염물질의 상관성	49
6. 풍향별 농도 비교	54
1) 풍향별 대기오염물질의 농도 비교	54
2) 풍향별 라돈과 대기오염물질의 농도 비교	59
IV. 요약 및 결론	66
V. 참 고 문 헌	68

List of Tables

Table 1. Specifications of SO ₂ , NO/NO ₂ /NO _x , O ₃ , CO and PM ₁₀ analyzer.	9
Table 2. Classification and measurement principles of radon detectors.	17
Table 3. Yearly mean and median concentrations of radon at Gosan site during 2006~2008.	20
Table 4. Comparison of radon concentrations between Gosan and other sites.	21
Table 5. Monthly mean concentrations of radon at Gosan site.	23
Table 6. Seasonal mean concentrations of radon at Gosan site.	23
Table 7. Hourly mean concentrations of radon at Gosan site.	27
Table 8. Sectional radon concentrations in accordance with high and low 10% of radon levels.	32
Table 9. Seasonal radon concentrations in accordance with high and low 10% of radon levels.	32
Table 10. Yearly mean concentrations of SO ₂ at Gosan and other urban areas. ·	38
Table 11. Yearly mean concentrations of NO ₂ at Gosan and other urban areas. ·	38
Table 12. Yearly mean concentrations of O ₃ at Gosan and other urban areas. ···	38
Table 13. Yearly mean concentrations of CO at Gosan and other urban areas. ·	39
Table 14. Yearly mean concentrations of PM ₁₀ at Gosan and other urban areas.	39
Table 15. Concentration of air pollutants corresponding to high (25%), medium (50%), and low (25%) radon levels.	50
Table 16. Seasonal and sectional concentrations of air pollutants.	55

List of Figures

Figure 1. Gosan measurement site located at the western tip of Jeju Island, Korea.	4
Figure 2. 700L-radon detector installed at Gosan site during January 2006~ July 2007.	5
Figure 3. 1500L-radon detector installed at Gosan site during July 2007~ December 2008.	6
Figure 4. The ^{238}U decay chain.	13
Figure 5. The ^{222}Rn decay chain.	13
Figure 6. Schematic diagram of dual-flow loop two-filter detector manufactured by ANSTO.	18
Figure 7. Variation of daily radon concentrations during January 2006~December 2008.	20
Figure 8. Comparison of radon concentrations for three years between 2006 and 2008.	21
Figure 9. Monthly comparison of radon concentrations at Gosan site.	24
Figure 10. Seasonal comparison of radon concentrations between 2006 and 2008.	24
Figure 11. Monthly comparison of 90 th percentile (left) and 10 th percentile (right) of radon concentrations during 2006~2008.	25
Figure 12. Monthly comparison of wind directions during the study period. ·	25
Figure 13. Hourly comparison of radon concentrations at Gosan site.	27
Figure 14. Sectional classification of Northeast Asia for backward trajectory analysis based on Gosan site.	29
Figure 15. 5-Day backward trajectories corresponding to high (upper) and low (lower) 10% of radon concentrations.	31

Figure 16. Sectional frequencies in accordance with high and low 10% of radon levels.	32
Figure 17. Seasonal frequencies in accordance with high and low 10% of radon levels.	33
Figure 18. Monthly comparison of radon concentrations at Gosan site.	41
Figure 19. Monthly comparison of SO ₂ concentrations at Gosan site.	41
Figure 20. Monthly comparison of NO ₂ concentrations at Gosan site.	42
Figure 21. Monthly comparison of O ₃ concentrations at Gosan site.	42
Figure 22. Monthly comparison of CO concentrations at Gosan site.	43
Figure 23. Monthly comparison of PM ₁₀ concentrations at Gosan site.	43
Figure 24. Seasonal comparison of hourly radon concentration at Gosan.	45
Figure 25. Seasonal comparison of hourly SO ₂ concentration at Gosan.	46
Figure 26. Seasonal comparison of hourly NO ₂ concentration at Gosan.	46
Figure 27. Seasonal comparison of hourly O ₃ concentration at Gosan.	47
Figure 28. Seasonal comparison of hourly CO concentration at Gosan.	47
Figure 29. Seasonal comparison of hourly PM ₁₀ concentration at Gosan.	48
Figure 30. Seasonal comparison of radon concentrations, classified into high (25%), medium (50%), and low (25%) levels.	51
Figure 31. Seasonal comparison of SO ₂ concentrations corresponding to high (25%), medium (50%), and low (25%) radon levels.	51
Figure 32. Seasonal comparison of NO ₂ concentrations corresponding to high (25%), medium (50%), and low (25%) radon levels.	52
Figure 33. Seasonal comparison of O ₃ concentrations corresponding to high (25%), medium (50%), and low (25%) radon levels.	52
Figure 34. Seasonal comparison of CO concentrations corresponding to high (25%), medium (50%), and low (25%) radon levels.	53
Figure 35. Seasonal comparison of PM ₁₀ concentrations corresponding to high (25%), medium (50%), and low (25%) radon levels.	53
Figure 36. Seasonal and sectional comparison of SO ₂ concentration.	57

Figure 37. Seasonal and sectional comparison of NO ₂ concentration.	57
Figure 38. Seasonal and sectional comparison of O ₃ concentration.	58
Figure 39. Seasonal and sectional comparison of CO concentration.	58
Figure 40. Seasonal and sectional comparison of PM ₁₀ concentration.	59
Figure 41. Concentration comparison of air pollutants corresponding to high (25%), medium (50%), and low (25%) radon levels in the wind direction of sector 1.	61
Figure 42. Concentration comparison of air pollutants corresponding to high (25%), medium (50%), and low (25%) radon levels in the wind direction of sector 2.	62
Figure 43. Concentration comparison of air pollutants corresponding to high (25%), medium (50%), and low (25%) radon levels in the wind direction of sector 3.	63
Figure 44. Concentration comparison of air pollutants corresponding to high (25%), medium (50%), and low (25%) radon levels in the wind direction of sector 4.	64
Figure 45. Concentration comparison of air pollutants corresponding to high (25%), medium (50%), and low (25%) radon levels in the local wind direction.	65

Abstract

The realtime monitoring of radon(^{222}Rn) concentrations for three years of 2006~2008 has been carried out to evaluate the timely variational characteristics of the background level concentrations of atmospheric radon at the Gosan site, Jeju Island. The mean concentration of radon for the studying period was $2,965 \text{ mBq/m}^3$, and the annual mean concentrations of each year were in the range of $2,768 \sim 3,124 \text{ mBq/m}^3$. In seasonal comparison, the order of the seasonal mean concentrations was as winter($3,578 \text{ mBq/m}^3$) > fall($3,351 \text{ mBq/m}^3$) > spring($2,832 \text{ mBq/m}^3$) > summer($2,073 \text{ mBq/m}^3$). The monthly mean concentrations were in the order of Jan > Feb > Oct > Nov > Dec > Mar > Sep > Apr > May > Jun > Aug > Jul, and the highest ($3,713 \text{ mBq/m}^3$) on January was almost twice as the lowest ($1,946 \text{ mBq/m}^3$) on July. The hourly concentrations in a day showed the highest ($3,356 \text{ mBq/m}^3$) at around 7 a.m. and the lowest ($2,574 \text{ mBq/m}^3$) at around 3 p.m., and increased again during nighttime. From the backward trajectory analyses for a continental fetch of radon, the high 10% concentrations of radon matched very much with when the air mass were moved from the north China and the Korean peninsula to Jeju area, whereas the low 10% concentrations have correlated with the air mass movement from the North Pacific Ocean. In comparison by air inflow sectors, the radon concentrations were relatively high on Sector 1 ($225^\circ \sim 337^\circ$, China continent) and low on Sector 4 ($135^\circ \sim 225^\circ$, north pacific). The radon concentrations have been compared with those of some air pollutants, and they showed a similar pattern with SO_2 and NO_2 as high in winter and low in summer, whereas a bit different trend to the O_3 concentrations. The hourly variation of radon concentrations was quite similar to that of CO as high at 7~8 a.m. and low at 2~3 p.m., whereas very opposite to that of O_3 .

I. 서 론

라돈(Rn)은 자연계에 널리 분포하는 대표적인 자연 방사성 물질이다. 지각의 암석이나 토양 중에 함유된 우라늄, 토륨과 같은 원소들은 몇 단계의 붕괴 과정을 거쳐 라돈을 생성한다. 라돈은 지각물질로부터 발생되기 때문에 주로 지하 공간에서 높은 농도를 보이고 지하수와 대기 중에서도 미량으로 검출된다. 또 라돈은 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 인체 위해성을 나타낸다(2009, 환경부, 2007).

선진국에서는 1980년대부터 정부 주도로 라돈지도 작성과 실내외 라돈 조치 기준을 설정하여 체계적으로 라돈 관리대책을 시행해오고 있다. 대표적으로 미국은 환경보호국과 주정부에 의해 1980년부터 실내라돈 조사를 실시하였고, 실내라돈 조치기준을 4 pCi/L, 수질 대체기준을 4,000 pCi/L로 설정하였다. 우리나라의 경우, 1988년 한국원자력안전기술연구원, 1992년부터 1995년까지 국립보건원에서 실내라돈조사를 수행하였다. 또 2000년대에 한국원자력안전기술연구원이 실내공간 조사를 실시하였다(제현국, 2010; US EPA, 2003). 최근 환경부에서는 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. 또한 환경부는 2007년 8월에 라돈종합관리대책을 발표하였다. 그리고 2012년까지 라돈에 안전한 실내환경조성을 위한 라돈측정기반 구축, 노출현황파악, 노출경로관리 등 종합적이고 단계적인 대책추진을 목표로 하고 있다. 2010년 환경부에서 발간한 실내라돈가이드라인은 미국 환경보호국의 라돈관련 홍보물을 참조하여 제작되었으며, 국가라돈정보센터(www.radon.or.kr) 및 홍보동영상을 제작하여 대국민 홍보를 적극 추진하고 있다. 현재 환경부는 2008년부터 추진해온 전국라돈지도 작성사업을 2013년까지 완료하여 라돈관리의 과학적 토대를 구축하는 한편, 국내 최초로 실내라돈 저감사업을 실시하여 다양한 유

형의 표준시공모델을 제시할 예정이다(제현국, 2010; 환경부 2007).

동아시아 지역은 1990년대 초 이후로 국경을 넘나드는 이른바 월경성(trans-boundary) 대기오염 문제가 주요한 환경문제로 부각되고 있다. 특히 한국, 중국, 일본을 중심으로 동북아시아 지역에서는 중국에서 발생한 황산화물, 질소산화물, 오존 등 대기오염물질의 장거리 수송(long-range transport)과 황사문제를 해결하기 위한 대책마련에 부심하고 있다(김상균 등, 2007). 최근에 이러한 월경성 대기오염물질의 관측 및 평가를 위해 3국이 공동으로 동북아시아 지역에서의 장거리 이동오염물질에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다. 한·중·일 장거리 이동 대기오염물질 공동연구사업(LTP, Long-range Transboundary Air Pollutants in Northeast Asia)은 이러한 동북아시아에서 대기오염물질 장거리 이동현상을 규명하고, 이를 공동으로 관리하기 위한 목적으로 수행되고 있다(강창희 등, 2007; 국립환경연구원, 2004).

일부 연구팀을 중심으로 라돈을 장거리 수송 대기오염물질들의 추적자로 활용하기 위한 연구가 시도되고 있다. SO₂, NO₂ 등의 대기오염물질은 대기 중에서 이동 중에 화학적 성분이 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 추적물질중의 하나로 알려져 있다(전형진 등, 2003; Jamil *et al.*, 1997). 현재 국내 라돈 관리 및 감시는 주로 실내나 지하 공간을 대상으로 이루어지고 있다. 그리고 국내에서는 아직까지 대기 중의 극미량 라돈을 모니터링하고 감시하기 위한 연구는 거의 이루어지지 못하고 있다. 그러나 라돈 관리와 추적자로서의 활용을 위해서는 극미량의 대기 라돈 농도를 지속적으로 모니터링 할 필요가 있다. 그리고 청정지역에서 대기 배경농도(background level)를 평가하기 위한 데이터의 확보가 이루어져야 한다.

아시아대륙의 편서풍 풍하 측에 위치한 한반도의 경우 대륙에서 발생하여 기류를 타고 장거리 이동하는 각종 오염물질의 영향을 크게 받고 있다. 그리고 라돈 역시 발생기원이 지각물질이기 때문에 해양에서 이동한 공기에 비해 대륙에서 생성된 공기에서 더 높은 농도를 나타낸다. ²²²Rn은 NO_x, SO₂, CO, O₃ 등의

대기오염물질들과 비슷한 수명을 나타내고 대기 에어로졸들과도 유사한 수명을 보인다. 따라서 ^{222}Rn 은 대기오염물질의 이동경로를 확인하기 위한 추적자로 활용도가 높다(강창희 등, 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 데에 매우 유용한 정보를 제공한다. 즉 라돈은 대기의 수직 확산을 관찰하는데 필요한 추적자로 활용이 가능하다(김윤신 등, 2007). 이처럼 대기 중의 라돈은 그 자체의 관리, 감시는 물론 대기오염물질, 온실가스 등의 발생기원 추적을 위해서도 지속적인 모니터링을 필요로 한다.

본 연구에서는 제주도 서쪽 끝 지점에 위치한 고산관측소에서 호주핵과학기술기구(ANSTO, Australian Nuclear Science and Technology Organisation)와 공동으로 라돈 배경농도를 실시간으로 측정하였다. 그리고 2006년부터 2008년까지 3년간의 라돈 시계열 변화와 농도변화 특성을 다양한 방법으로 조사하였다. 또 주요 대기오염물질인 SO_2 , NO_2 , O_3 , CO , PM_{10} 과 라돈과의 상관성 비교를 통해 대기오염물질의 농도변화와 장거리 이동 특성을 다각도로 조사하였다.

II. 실험

1. 측정소 설비 및 측정기기

1) 측정소 설비

본 연구를 위한 측정소는 제주도 제주시 한경면 고산리 소재 수월봉(33°28' N, 127°17' E)에 컨테이너를 설치하여 마련하였다. 제주도 서쪽 끝 지점에 위치한 이 지역은 바다와 바로 인접해 있으며 자체오염원이 거의 없는 청정지역이다. 측정설비는 제주 고층 레이더 기상대로부터 서쪽 방향으로 약 300 m 떨어져 있는 해발 72 m의 언덕위에 위치하고 있다. 측정 장비 탑재를 위한 컨테이너 내부에는 에어컨, 제습기, AVR 등을 설치하여 기기작동에 적합한 온도, 습도 및 안정된 전원을 공급하였다.



Figure 1. Gosan measurement site located at the western tip of Jeju Island, Korea.

2) 측정기기

(1) Radon(^{222}Rn) Detector System

라돈 검출기는 배경농도 측정을 위한 고감도 장비로 호주 ANSTO(Australian Nuclear Science and Technology Organisation)에서 자체적으로 설계, 제작한 시스템을 사용하였다. 이 검출기는 필터를 거친 후 자연확산 또는 동력펌프를 통해 셀 내로 유입된 라돈과 셀 내부에서 생성된 라돈자손으로부터 방출된 알파입자가 ZnS(Ag)와 반응하여 발생한 섬광을 광전증배관으로 검출하여 계수하는 방식이다. 라돈 검출기는 2006년 1월부터 2007년 7월까지 감도(Sensitivity)와 검출한계(Detection Limit)가 각각 $0.21 \text{ counts}\cdot\text{sec}^{-1}/\text{Bqm}^{-3}$, 90 mBq/m^3 인 고감도 라돈 검출기를 사용하였다. 그리고 2007년 7월부터 2008년 12월까지는 이보다도 더 고감도인 감도 $0.28\sim 0.29 \text{ counts}\cdot\text{sec}^{-1}/\text{Bqm}^{-3}$, 검출한계 25 mBq/m^3 의 시스템을 고산측정소에 설치하여 측정하였다.



Figure 2. 700L-radon detector installed at Gosan site during January 2006 ~July 2007.



D1500



Figure 3. 1500L-radon detector installed at Gosan site during July 2007~ December 2008.

(2) SO₂ Analyzer

아황산가스 측정용 분석기기는 Pulsed fluorescence SO₂ analyzer로 미국 Thermo Environment Instruments Inc.의 모델 43C-TL을 사용하였다. 측정 데이터는 (주)태창의 Data Acquisition System (Model TDL-1000)을 사용하여 수집하였다.

(3) NO/NO₂/NO_x Analyzer

질소산화물 측정용 분석기기는 Chemiluminescent NO-NO₂-NO_x analyzer로 미국 Thermo Environment Instruments Inc.의 모델 42C-TL을 사용하였다. 측정된 데이터는 (주)태창의 Data Acquisition System (Model TDL-1000)을 사용하여 수집하였다.

(4) O₃ Analyzer

오존 측정용 분석기기는 UV photometric O₃ Analyzer로 미국 Thermo Environment Instruments Inc.에서 제작한 모델 49C를 사용하였다. 측정 데이터

는 (주)태창의 Data Acquisition System (Model TDL-1000)을 사용하여 수집하였다.

(5) CO Analyzer

일산화탄소(CO) 측정용 분석기기는 Non-dispersive infrared CO Analyzer로 미국 Thermo Environment Instruments Inc.의 모델 Model 48C를 사용하였다. 측정 데이터는 (주)태창의 Data Acquisition System (Model TDL-1000)을 사용하여 수집하였다.

(6) Calibration System

SO₂, NO/NO₂/NO_x, O₃, CO Analyzer의 검정(calibration)용 표준가스는 미국 Thermo Environment Instruments Inc.에서 제작한 Multigas Calibration System (Model 146)을 사용하여 조제하였다. 이 시스템은 Ozone Generator가 부착되어 있어서 일정 농도의 오존을 발생시킬 수 있고, O₃ Analyzer의 검정도 가능하도록 구성되어 있다.

(7) PM₁₀ Analyzer

10 μm 이하의 미세입자 농도 측정을 위한 PM₁₀ Analyzer는 미국 Met One Instruments Inc.의 β-Ray Particulate Monitoring System (Model BAM 1020)을 사용하였다. 시료 공기 흡입은 일본 MEDO사 (Model BX-127 Pump 230, 60 L/min) 진공펌프를 사용하였고, 유량은 16.7 L/min이 되도록 조절하였다.

(8) 전원 및 항온 설비

가스상 물질 측정용 장비는 에어컨, 제습기 등을 사용하여 항온, 항습 조건에서 작동하였다. 컨테이너의 실내온도는 에어컨을 사용하여 대략 25℃가 되도록 유지하였고, 에어컨은 Carrier사의 모델 CX-351F와 세기사의 모델 PA-A74GY3를 사용하였다. 220 V 및 110 V 전원은 대영ENT(주)의 UPS (Model Finups Duss-60과 Model UX-210T)을 사용하여 순간 정전, 전압강하, Noise 등을 방지하고 안정된 정전압과 정주파수의 전원을 공급하였다.

2. 라돈 농도 모니터링

라돈 농도 데이터는 Radon Detector System에 내장된 Campbell Scientific사의 모델 CR800 data logger를 사용하여 30분 간격으로 저장하였다. 그리고 data logger에 저장한 데이터를 컴퓨터로 전송하여 연속적으로 저장하였다. 측정 데이터의 검정은 월 1회 주기로 매회 5시간 동안 실시하였으며, 검정용 ^{222}Rn standard source는 $18.5\pm 4\%$ kBq의 ^{226}Ra source (Pylon Electronic Inc., 모델 RN-2000A, Canada)를 사용하였다. 또한 검출기의 배경(background) 값은 대략 3개월 주기로 측정하였고, 공기의 유입을 차단한 상태에서 기기의 지시수치를 24시간 동안 측정하여 결정하였다. 이 때 배경값은 검출기의 2차 필터에 포집된 ^{210}Pb (반감기 22.3년)의 양에 따라 변화하며 시간이 경과됨에 따라 서서히 상승하는 경향을 보였다.

3. 오염물질 농도 측정

1) 가스상 오염물질 농도 측정

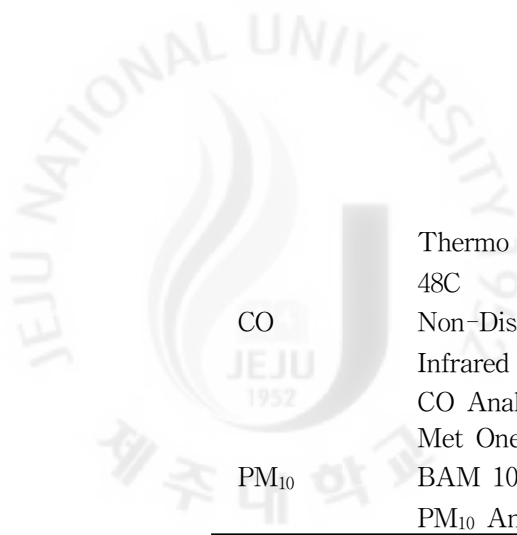
SO_2 , NO_x , O_3 , CO 등의 가스상 오염물질의 농도는 고산측정소 현장에서 환경부/환경관리공단이 측정한 결과를 이용하였다. 이들 가스상 오염물질들은 환경부/환경관리공단이 제주도 고산측정소에 SO_2 Analyzer, $\text{NO-NO}_2\text{-NO}_x$ Analyzer, O_3 Analyzer, CO Analyzer를 설치하여 2001년 이래 5분 간격으로 실시간 측정해 오고 있다. 본 연구에서는 이들 중 2006년 1월부터 2008년 12월까지 3년간 측정한 결과를 활용하였다. 데이터는 기기가 비정상적으로 가동되었거나 또는 농도가 비정상적으로 너무 높거나 낮은 데이터들을 배제하고 최종적으로 1시간 동안의 측정값을 평균하여 정리하였다. 이 때 측정에 사용한 SO_2 Analyzer, $\text{NO-NO}_2\text{-NO}_x$ Analyzer, O_3 Analyzer, CO Analyzer의 측정범위와 검출한계는 Table 1과 같다.

2) PM₁₀ 미세먼지 농도 측정

PM₁₀ 미세먼지는 환경부/환경관리공단에서 측정한 결과를 이용하였다. PM₁₀은 β-Ray를 이용한 Particulate Monitoring System을 사용하여 2006년 1월부터 2008년 12월까지 1시간 간격으로 연속 측정하였다. PM₁₀ 미세먼지는 흡입부에 입자분리장치(cyclone)를 설치하여 입자크기가 10 μm 이상인 입자를 제거하였다. 미세입자 농도는 유리섬유 재질의 BAM Filter Tape (roll tape, 30 mm × 10 m)에 1시간 동안 미세입자를 포집한 후 여기에 β-Ray (Kr-85 β-source)를 조사하고, 미세입자 포집 전과 후의 전류세기 차이를 비교하는 방법(Lenard's law)으로 측정하였다. 이 때 공기의 유속은 16.7 L/min이 되도록 설정하였고, 수분에 의한 질량농도 오차를 줄이기 위해 흡입관은 가온 시스템을 부착하여 40~50℃ 정도로 유지하였다. 본 연구에서 사용한 PM₁₀ 미세먼지 측정기의 측정범위와 검출한계는 Table 1과 같다.

Table 1. Specifications of SO₂, NO/NO₂/NO_x, O₃, CO and PM₁₀ analyzer.

Components	Analyzer	Ranges	Detection limit	Linearity	Theory
SO ₂	Thermo Model 43C Pulsed Fluorescence SO ₂ analyzer	~1000 (ppb)	0.10 ppb (60 sec avg. time)	±1%	Absorption 190~320 nm
	Thermo Model 42C				
NO-NO ₂ -NO _x	Chemiluminescence Analyzer Thermo Model 49C Pulse Ultra	~500 (ppb)	50 ppt (120 sec avg time)	±1%	NO+O ₃ →NO ₂ [*] +O ₃ NO ₂ [*] →NO ₂ +hv (>600 nm) 2NO ₂ +MO → 3NO+MoO ₃
O ₃	Violate Fluorescence Method O ₃ Analyzer	~2000 (ppb)	1.0 ppb	±1%	Absorption 254 nm



CO	Thermo Model 48C	~100 (ppm)	0.2 ppm	±1%	Absorption 4.6 μm
	Non-Dispersive Infrared Method CO Analyzer				
PM ₁₀	Met One Model BAM 1020	~10 (mg/m ³)	±2 μg/m ³	±2 μg/m ³	β-Ray Absorption
	PM ₁₀ Analyzer				

3) 측정 데이터의 수집

SO₂, NO_x, O₃, CO 등 가스상 오염물질의 농도와 PM₁₀ 미세먼지 농도는 Data Acquisition System (Thermo Environment Instruments Inc., Model 146)을 사용하여 지속적으로 데이터를 수집하였다. SO₂, NO_x, O₃, CO 가스상 물질들은 각 성분별로 5분 간격으로 측정 데이터를 저장하였고, PM₁₀ 미세먼지 농도는 1시간 간격으로 데이터를 수집하였다. 그리고 가스상 물질 분석 장비와 PM₁₀ 미세먼지 측정 장비는 정확도 향상을 위하여 수시검정과 주간검정, 월간검정 등의 주기적 검정을 실시하였으며, 모든 작업은 환경부/환경관리공단에서 실시하였다.

4. 역궤적 분석

일반적으로 대기오염물질은 1.5~4 km 고도를 통해 이동하고, 특히 황사의 경우 대체적으로 500 mb 면의 아래층에서 이동되며, 주로 700 mb 면이나 850 mb 면의 하층 바람에 의해 수송되는 것으로 알려져 있다. 또한 700 mb와 850 mb 기압면에 대한 역궤적(backward trajectory)은 일기도를 이용하여 직접 작성이 가능하고, 대기 경계층 이동을 보다 잘 묘사하는 중층개기의 바람 이동을 살펴 볼 수 있는 장점을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서도 역궤적 분석을 위한 출발점 고도를 850 mb 면인 1500 m 로 설정하였고, 출발시간은 해당 날짜의 매 00 UTC (KST 09:00)를 이용하였다. 역궤적 분석은 미국해양대기국(NOAA,

National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 HYSPLIT4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 이용하였다. 그리고 고산지역(33°28' N, 127°17' E)을 도착지점으로 5일간의 역궤적 경로를 모사하였고, 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 예보자료로 구성되어 있다(고희정, 2010; 김경원 등, 2008; 김나경, 2003; Draxler, 1996).

III. 결과 및 고찰

1. 라돈의 발생 및 모니터링

1) 라돈의 발생

라돈은 원자번호 86인 무색, 무취, 무미의 불활성 기체 물질이며, 대표적인 천연 방사성 핵종이다. 라돈은 지각의 암석이나 토양 중의 우라늄(^{238}U , ^{235}U), 토륨(^{232}Th)이 여러 단계의 붕괴과정을 거치는 과정에서 생성된다. 자연계의 주요 라돈 동위원소는 ^{222}Rn (radon), ^{220}Rn (thoron), ^{219}Rn (actinon)의 세 가지이며, 주로 ^{222}Rn 로 존재한다. ^{220}Rn 은 토륨(^{232}Th)의 붕괴에 의해 중간체인 ^{224}Ra 를 거쳐 생성되며 반감기가 54.5초로 매우 짧다. 또 ^{219}Rn 은 우라늄(^{235}U)의 붕괴 생성물로 ^{223}Ra 를 거쳐 생성되며, 반감기가 3.9초로 아주 짧아서 대기 중에서의 농도가 낮다. 그러나 ^{222}Rn 은 앞의 두 동위원소에 비해 3.824일의 훨씬 긴 반감기를 나타낸다. 그리고 라돈 방사성 동위원소 중에서 가장 널리 분포하며, 자연 방사선 중에서 가장 많은 부분을 차지한다(문기훈 등, 2009; US EPA 2007)(Figure 4)(S. Whittlestone *et al.*, 1998). 또한 ^{222}Rn 는 3.824일의 반감기를 지나 4번의 알파붕괴와 4번의 베타붕괴를 일으켜, 최종적으로 안정한 ^{216}Pb 으로 전환된다(Figure 5)(문기훈 등, 2009; US EPA 2007).

라돈의 배출원인 우라늄은 지구상의 모든 토양 중에 조금씩 섞여 있기 때문에 모든 토양에서 미량이지만 라돈이 방출된다. 또 라돈은 화학적으로 불활성이어서 이동도가 크고, 공기보다 9배 정도 무겁기 때문에 지표에 가깝게 존재하여 인간에게 쉽게 흡입될 가능성이 크다. 라돈은 모든 지표지질환경에 존재하며, 지하수, 건축자재, 암석, 토양에서 방출/발산되어 실내공간에 쉽게 농집될 수 있다(최임조 등, 2009; Vogiannis and Nikolopouls, 2008; Vinson *et al.*, 2008; Font *et al.*, 2008; Bonotto and Padron-Armada, 2008; Font and Baixeras, 2003). 라돈에서 방출되는 방사선 양은 SI 단위인 Bq (1초에 1개의 원자핵이 붕괴할 때의

방사선 세기) 또는 Ci(라듐 1 g이 1초에 방출하는 방사선 양)로 나타내며, 1 Ci
 는 37×10^9 Bq이다.

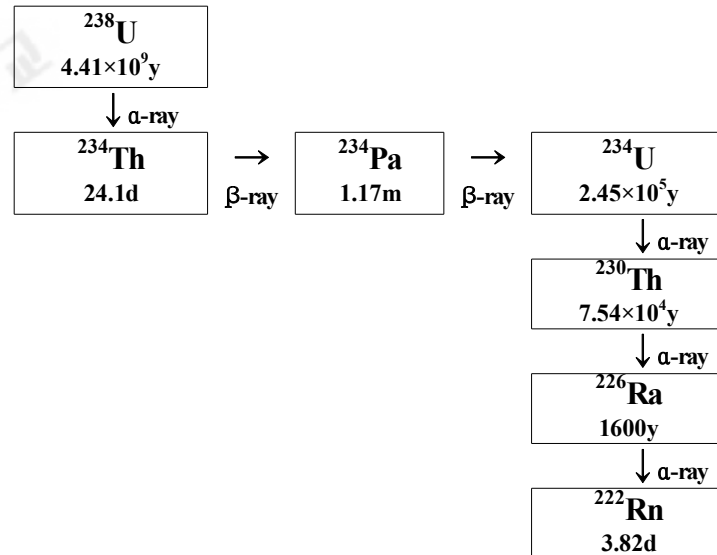


Figure 4. The ^{238}U decay chain.

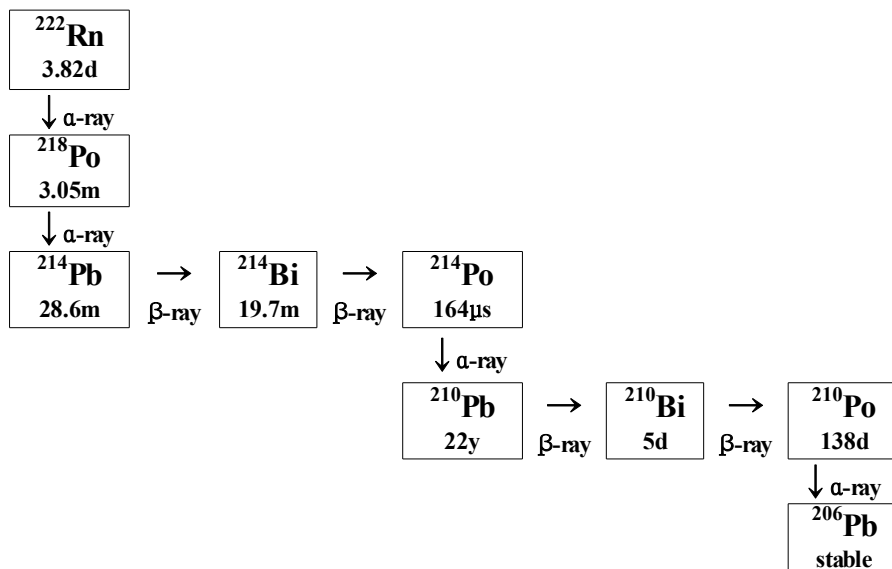


Figure 5. The ^{222}Rn decay chain.

2) 라돈의 위해 및 관리

라돈은 안정하여 대기 중에 충분한 시간 동안 머물러 있으므로 다른 자연방사선원에 비하여 라돈과 라돈자손에 의한 일반인의 자연방사선 피폭 기여도가 높고, 인체에 흡입되어 폐암을 일으키는 원인으로 알려져 있어 인간의 건강을 위협하는 오염물질로 규정되어 있다(김윤신 등, 2002; Jamil *et al.*, 1997). 발암성 방사성물질인 라돈(radon)은 세계보건기구(WHO)에 의해 흡연 다음으로 폐암을 유발하는 위험물질로 규정되어 있으며, 국제암연구센터(IARC; International Agency for Research on Cancer)에서는 1급 발암물질로 규정했을 만큼 인체에 치명적인 영향을 미치는 위해성 물질이다.

라돈은 자체 보다는 라돈 자핵 종인 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 유발한다(최임조 등, 2009; Miles, 1988). 세계보건기구(WHO, 2000)는 건물의 라돈 연간평균농도가 100 Bq/m^3 (2.7 pci/L) 이상일 때 치유 활동을 취할 것을 권고하고 있다. 또 미국 US EPA에서는 권고치로서 148 Bq/m^3 (4 pci/L)를 제안하고 있고, 이 농도에서 일생 동안 노출될 경우 폐암으로 사망할 위험 확률은 약 1~2%로 추정하고 있다. 2003년 한 해에만 약 21,000명의 폐암 사망자가 라돈 노출과 관련이 있는 것으로 보고되고 있다(최임조 등, 2009; US EPA, 2009; 2006).

미국은 환경보호국과 주정부에 의해, 실내 라돈 조사를 1980년부터 수행하였으며, 최근까지, 3개의 Zone(Zone1-high risk area, Zone2-medium risk area, Zone3-low risk area)으로 구분된 조사 표본에 대해 주정부와 민간을 중심으로 약 10%에 육박하는 가옥에 대한 조사가 수행되었다(US EPA, 2008). 또한, 가옥 내 라돈 평가를 위한 기초자료 확보 차원에서 1989년부터 1992년 사이에 지질조

사소 (USGS, United States Geological Survey)의 협조로 라돈포텐셜 평가가 수행되었다. 또한 환경보호국에 의해라돈에 관한 시민가이드(A Citizen' Guide to Radon) 및 실내 라돈저감공법 관련 책자를 발간하여 대국민 홍보가 적극적으로 이루어지고 있다. 미국의 실내라돈 조치기준은 4 pCi/L이며, 수질 대체기준은 4,000 pCi/L(주정부 또는 지역의 수처리시스템이 MMM(Multimedia Mitigation) 프로그램을 수행할 경우에 해당)이다. 영국의 경우, 지질조사소(BGS, British Geological Survey)와 방사선방호위원회(NRPB, National Radiological Protection Board)를 중심으로, 1980년부터 현재까지 지속적으로 실내라돈조사가 수행되고 있으며, 총 45만개 이상의 자료가 구축되어 있는 상태이다. 고농도지역은 5 km 격자, 나머지지역은 10 km 격자별로 라돈분포도(Radon Atlas)를 작성하였다(NRPB, 2000). 실내라돈 조치기준은 5.4 pCi/L(200 Bq/m³)이며, 고농도 지역에 위치한 건물의 경우, 정부가 라돈 측정을 권고하고 있다. 일본의 경우, 국립방사선의학연구소(NIRS; National Institute of Radiological Sciences) 및 일본화학분석센터(JCAC; Japan Chemical Analysis Center)에 의해 1994년~1996년 동안 899개의 실내조사가 수행되었다. 2004년 이후에는 고농도 가옥에 대한 조사에 집중하고 있는데, 각 현별로 연간 2,000개 가옥에 대해 조사를 수행하고 있는 실정이다. 스웨덴의 경우, 실내라돈농도 관리기준(의무사항)을 보면, 기존주택의 경우는 10.8 pCi/L(400 Bq/m³), 신규주택의 경우는 5.4 pCi/L(200 Bq/m³)로 설정하고 있다. 토양가스의 라돈농도가 270 pCi/L 이상일 때는 라돈방어 기준(radon protection level)을, 1,350 pCi/L 이상일 때는 라돈안전기준(radon safety level)을 적용하고 있으며, 토목 및 건축공사 시 토양가스 라돈조사를 의무화하고 있다. 체코와 독일의 경우, 2000년도 이후, 양국의 지질조사소 공동연구로 실내 라돈조사가 수행되었으며, 지리정보시스템 기술을 접목하여 토양가스 라돈지도 및 실내 라돈지도를 작성하였다. 특히, 체코의 경우, 건물의 신축부지에 대해 토양가스 라돈측정 지침과 규제기준을 세분화하여 적용하고 있는 실정이며, 신축부지 토양가스 라돈조사를 의무화하고 있다(제현국, 2010).

우리나라에서는 1989년에 “지하 공간 환경기준 권고치 설정”으로 라돈의 권고기준을 148 Bq/m³ (4 pci/L)로 정하였고, 1996년 “지하 생활 공간 공기질 관리법”에서는 라돈을 오염물질로 규정하였다. 2003년에는 “다중이용시설 등의 실내

공기질 관리법”의 제정으로 라돈의 권고기준을 148 Bq/m^3 (4 pci/L)로 정하였다 (최임조 등, 2009; 환경부, 2003).

3) 라돈 검출 시스템

라돈농도 측정용 검출기는 전원 사용 여부에 따라 크게 수동형과 능동형 두 종류로 구분된다. 수동형 측정기는 전원이 필요 없는 방법으로 알파비적검출법(alpha track detector), 활성탄 흡착법(Activated charcoal adsorption devices), 충전막전리함법(electret ion chamber) 등이 있다. 또 능동형 측정기는 전원을 필요로 하는 방법으로 섬광셀 검출방식(Scintillation cell), 펄스이온화검출방식(Pulsed ionization chambers), 실리콘 검출방식(Silicon detector) 등이 이용되고 있다(Table 2). 일반적으로 수동형 측정방법은 비교적 사용이 간편하고, 검출기의 가격이 매우 경제적인 장점이 있다. 그러나 장기간 측정해야 하기 때문에 신속한 측정값을 얻기 어려우며, 외부환경(온습도, 마찰전하 등)에 의해 결과의 신뢰성이 저하되는 단점이 있다. 반면에 능동형 측정방법은 측정현장에서 신속한 측정값 및 연속적인 측정 자료를 얻을 수 있는 장점을 지닌다. 그리고 검출기의 가격이 매우 고가이며, 전문가에 의한 검출기의 교정 작업이 필요하다는 단점이 있다(제현국, 2010). 이러한 수동형과 능동형 라돈 검출기들은 대부분 실내나 지하 공간에서 비교적 높은 농도의 라돈을 측정하기 위한 목적으로 개발되었다. 따라서 기존의 상용화된 라돈 검출기들은 대기 중에 존재하는 극미량의 라돈을 모니터링하기에는 부적합한 시스템들이다.

대기 중의 라돈은 실내나 지하 공간에 비해 농도가 훨씬 낮은 농도를 측정해야 하기 때문에 아주 고감도의 검출기를 필요로 한다. 호주핵과학기술기구(ANSTO, Australian Nuclear Science and Technology Organisation)에서는 이러한 고감도 라돈검출기를 자체적 설계, 제작하고 있다. 그리고 WMO(World Meteorological Organization)와 GAW(Global Atmosphere Watch) 관측소를 중심으로 세계적인 라돈 측정망을 구축하여 운영하고 있다(W. Zahorowski, 2004; Y. Igarashi, 2004). ANSTO에서 제작한 라돈 검출기는 능동형 섬광셀 검출방식을 이용하고 있고 실시간으로 연속 모니터링이 가능한 시스템이다. Figure 6의

기기구조와 같이 셀 안으로 유입된 공기 중의 라돈은 붕괴과정에서 알파입자를 방출하고, 이 입자와 ZnS(Ag)가 반응하여 발생하는 섬광을 광증배관으로 증폭하여 계수하는 섬광셀 검출방식 원리를 이용하고 있다.

국내에서는 2001년에 처음으로 제주도 고산 관측소에 ANSTO에서 제작한 라돈검출기를 설치하여 대기 중의 라돈 농도를 모니터링하기 시작하였다. 그리고 2007년부터는 훨씬 더 고감도인 라돈 검출기(모델 D1500)를 사용하여 국내 대기 중의 라돈 배경농도를 실시간으로 측정하고 있으며, 본 연구에서는 이 시스템을 이용하여 라돈을 연속 모니터링하였다.

Table 2. Classification and measurement principles of radon detectors.

Type	Detector	Principle
Passive Type	Alpha Track Detector (알파비적검출)	플라스틱, 셀룰로스 필름표면의 알파 입자 비적을 계수
	Activated Charcoal Adsorption (활성탄흡착)	활성탄으로 확산 라돈가스를 흡착한 후 자핵종의 감마선을 계수
	Electret Ion Chamber (충전막전리함)	전리함에 유입된 라돈가스 붕괴 시 생성된 라돈 이온과 전자를 측정하여 계수
Active Type	Scintillation Cell (섬광셀검출)	ZnS(Ag) 섬광셀과 알파입자의 반응으로 발생한 섬광을 광증배관으로 계수
	Pulsed Ionization Chamber (펄스이온화검출)	전리함 내 라돈붕괴 시 생성된 자핵종을 전기적인 펄스 형태로 변환하여 계수
	Silicon detector (실리콘검출)	2,200V의 높은 전위차를 이용하여 붕괴된 자핵종을 실리콘검출기 표면에 포집하여 계수

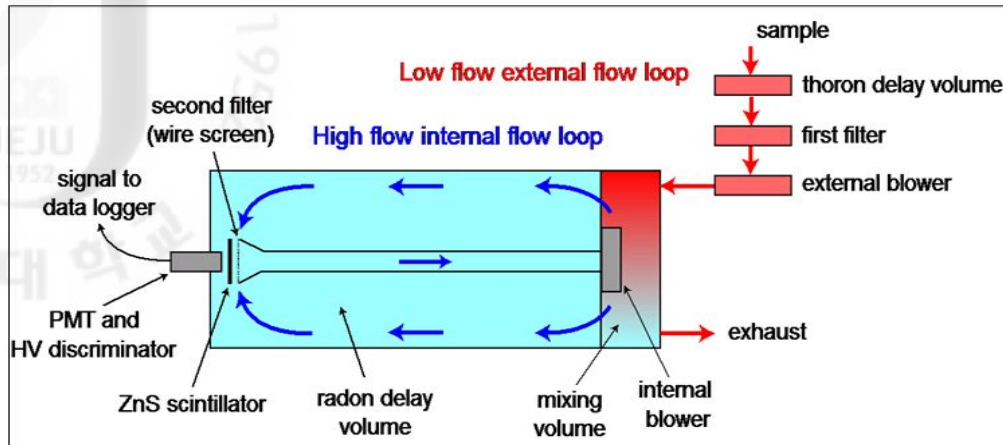


Figure 6. Schematic diagram of dual-flow loop two-filter detector manufactured by ANSTO (Whittlestone and Zahorowski, 1998).

2. 라돈의 시계열 변화 특성

1) 대기 라돈 배경농도

라돈은 화학적으로 불활성이기 때문에 대기 중에서 반응성이 없고, 빗물에도 거의 용해되지 않기 때문에 넓게 확산되는 이동 특성을 나타낸다. 그리고 기체상으로 존재하기 때문에 대기 중에서 기류를 타고 멀리 이동할 수 있다. 또 공기보다 9배나 무겁기 때문에 고도가 높아질수록 더 낮은 농도를 나타내고, 기단(air mass)의 발원 조건에 따라 큰 농도차를 보인다. 일반적으로 발생기원이 지각이기 때문에 해양에서 이동한 공기에 비해 대륙에서 생성된 공기에서 2~3배 더 높은 농도를 보이는 것으로 조사되고 있다.

본 연구에서는 2006년 1월부터 2008년 12월까지 총 3년간 지속적으로 라돈농도를 실시간 모니터링 하였고, 이 결과로부터 국내 청정지역에서 라돈의 배경농도 수준을 확인하였다. 그리고 이 결과를 Table 3~4과 Figure 7~8에 나타내었다. 먼저 3년간의 전체 평균농도는 2965 mBq/m^3 를 나타내었고, 연구 기간의 전체 일평균농도는 $2954 \pm 1200 \text{ mBq/m}^3$ 로 두 값 간에는 큰 차이를 보이지 않았다.

그리고 연구기간의 연도별 농도(Table 3, Figure 8)는 2006년에 3124 mBq/m³, 2007년에 3007 mBq/m³, 2008년에 2768 mBq/m³로 농도가 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 또 연도별 농도를 90퍼센타일(90th percentile)과 10퍼센타일(10th percentile)로 구분하여 비교한 결과에서는 90퍼센타일 농도는 연도별로 점점 낮아지는 추세를 보였으나 10퍼센타일은 3년간 별 차이를 나타내지 않는 것으로 조사되었다. 이처럼 연도별로 농도가 조금씩 감소한 이유는 2007년 7월에 라돈 검출기를 더 고감도의 시스템(모델 D700에서 모델 D1500교체)으로 교체하면서 공기 흡입관의 높이를 5 m에서 10 m로 높였기 때문에 이에 기인한 변화로 보인다. 고산지역에서 2001~2006년 측정된 이전의 결과를 보면, 2673~3124 mBq/m³의 범위에서 연도별로 큰 차이를 보이지 않았던 것으로 나타나고 있다.

고산지역의 평균농도를 국내외 타 지역들의 농도와 비교하여 Table 3에 나타내었다. 국내의 경우, 주로 실내와 지하 공간을 중심으로 측정 결과들이 발표되고 있고, 대기 중의 농도는 측정결과가 많이 부족한 상태이다. 따라서 이를 김윤신 등(2007년)이 1999년 12월부터 2002년 1월에 능동형 Electrostatic Radon Monitor를 사용하여 서울 성동구(한양대학교)에서 측정한 결과와 비교해 보았다(김윤신 등, 2007). 이 시기의 서울지역 라돈 농도는 7620±4110 mBq/m³의 범위를 보이고 있으며, 이에 비해 고산지역은 2.6배 정도 더 낮은 배경농도를 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, 3,397 m 고도에 위치하고 있고, 대륙으로부터 멀리 떨어진 청정지역이기 때문에 단순히 농도만으로 두 지역을 비교하기는 어려운 조건이다. 그러나 홍콩의 King's Park Meteorological Station이나 이탈리아의 도심지인 Milan 지역(Milan University)에 비해서는 고산지역이 각각 3.1, 3.2배 더 낮은 배경지역의 특성을 나타내고 있는 것으로 조사되었다.

Table 3. Yearly mean and median concentrations of radon at Gosan site during 2006~2008.

Year	Concentration (mBq/m ³)			
	2006	2007	2008	Overall
Mean	3124	3007	2768	2965
Median	2939	2879	2707	2827
S.D.	1621	1571	1286	1506

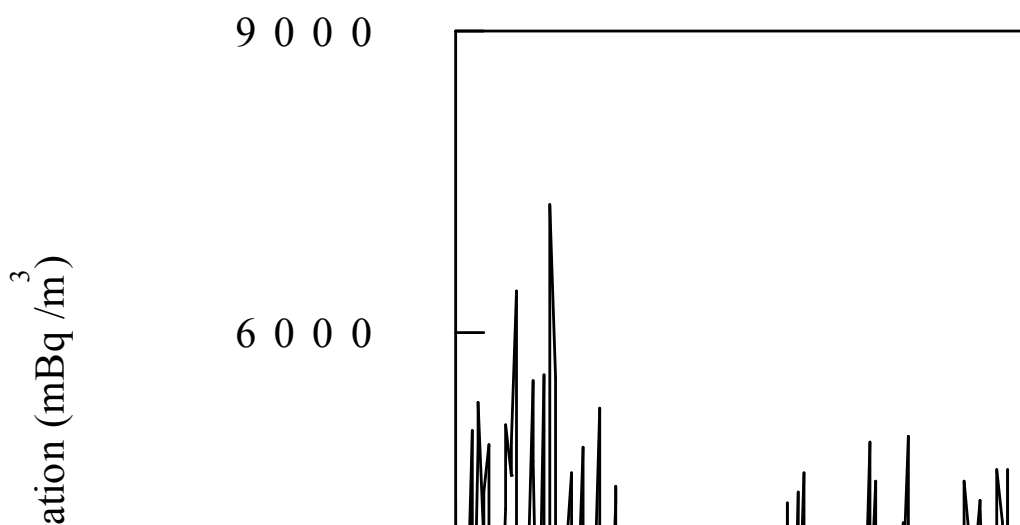


Figure 7. Variation of daily radon concentrations during January 2006~December 2008.

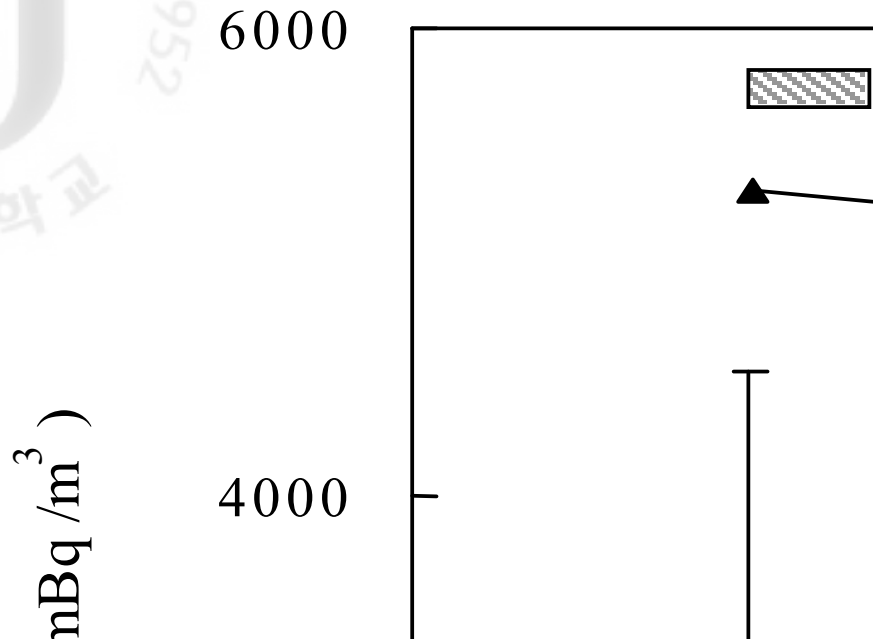


Figure 8. Comparison of radon concentrations for three years between 2006 and 2008.

Table 4. Comparison of radon concentrations between Gosan and other sites.

Site	Concentration (mBq/m ³)	Period
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 Site (this study)	2954±1200	2006. 1 ~ 2008. 12

¹⁾김윤신 등, 2007; ²⁾Chambers et al., 2009; ³⁾Zahorowski, W et al., 2005; ⁴⁾Chan et al., 2010;

⁵⁾Sesana, 2003.

2) 월별, 계절별 농도 비교

측정기간의 라돈 농도의 월별 변화를 Figure 9에 나타냈었다. 그림에서 막대 그래프는 3년간의 시간별 농도를 기준으로 월별로 평균한 농도이고, 꺾은선 그래프는 각각 중앙값과 90퍼센타일(90th percentile), 10퍼센타일(10th percentile)을 나타낸 결과이다. 이러한 월별 비교에서 전체적으로는 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. 또 일 2회 측정된 일별 고층기상자료(850 hPa)를 월별로 평균하여 그 풍향을 Figure 12에 나타내었다. 이 결과와 라돈의 월별 농도를 비교해 보면, 라돈 농도가 높은 1, 2월에는 주로 중국과 한반도(225°~15°)에서 바람이 불었고, 반대로 라돈 농도가 낮은 6~9월에는 주 풍향이 북태평양과 일본 방향임을 알 수 있다. 또한 3년간 월별 농도를 90퍼센타일과 10퍼센타일로 구분하여 비교해 본 결과(꺾은선 그래프로), 10퍼센타일 값은 월별 평균 농도와 같은 추세를 나타내었다. 그러나 90퍼센타일 값은 대체적으로 비슷한 경향을 보이거나 평균농도가 가장 낮은 7, 8월에 비해 5, 6월에 더 낮은 값을 나타내어 다소 차이를 보였다. 또한 월별 90퍼센타일과 10퍼센타일 값을 연도별로 비교한 Figure 11을 보면, 10퍼센타일의 경우에는 월별 농도변화와 비슷한 패턴을 보였으나, 90퍼센타일 값은 일정한 패턴을 나타내지 않고 불규칙하게 변하였다. 이로 보아 월별 고농도 사례는 풍향이 대륙에서 이동할 때 불규칙적으로 변화하고, 월 평균 농도에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 추정된다.

연구 기간의 라돈 농도를 계절별로 비교하여 Table 6와 Figure 10에 나타내었다. Table 6의 결과를 보면, 라돈 계절별 평균농도가 봄철에 2832 mBq/m³, 여름철에 2073 mBq/m³, 가을철에 3351 mBq/m³, 겨울철에는 3578 mBq/m³로 4계절 중 겨울에 가장 높은 농도를 보였고, 다음으로 가을, 봄, 여름 순이었다. 또한 90퍼센타일과 10퍼센타일을 꺾은선 그래프로 비교해 본 결과, 90퍼센타일, 10퍼센타일 모두 계절별 평균농도와 같은 경향을 나타내었다. 이처럼 계절별 라돈농도가 차이가 나는 이유는 북서계열 풍향이 주류를 이루는 겨울철에 대기가 대륙의 영향을 많이 받고, 반대로 남동 계절풍의 영향으로 해양으로부터 공기가 이동하

여 여름철에 농도가 낮은 것으로 추측된다. 또 대기 혼합고(mixing height)의 높이는 대기경계층(planetary boundary layer)이 대류상태에 있고 대기오염물이나 대상 성분기체 농도가 균일한 연직분포를 이루고 있을 때 혼합된 층의 높이로, 대기오염물의 누적, 확산, 희석에 중요한 역할을 한다(김의훈 등, 1985; Myrup, 1980; Duckworth and Sandberg, 1954). 계절별 대기 혼합고를 비교해 보면, 대체적으로 가을과 겨울에는 기온이 낮아서 혼합고 높이가 낮아지는 반면, 봄과 여름에는 대기 혼합고의 높이가 상대적으로 높게 나타난다. 따라서 대기 중의 계절별 라돈농도는 혼합고의 높이에 반비례하여 겨울과 가을이 높은 농도를 유지하고 봄과 여름이 낮은 농도를 유지하는 것으로 추정된다(김윤신 등, 2007).

Table 5. Monthly mean concentrations of radon at Gosan site.

Month	Concentration (mBq/m ³)			Month	Concentration (mBq/m ³)		
	Mean	Median	S.D.		Mean	Median	S.D.
Jan	3713	3372	1439	Jul	1946	1575	1664
Feb	3642	3406	1519	Aug	1997	1559	1689
Mar	3078	2956	1182	Sep	3007	2913	1238
Apr	2932	2782	1177	Oct	3543	3297	1366
May	2493	2356	1009	Nov	3496	3356	1403
Jun	2266	2072	1339	Dec	3398	3235	1430

Table 6. Seasonal mean concentrations of radon at Gosan site.

Statistics	Concentrations (mBq/m ³)			
	Spring	Summer	Fall	Winter
Mean	2832	2073	3351	3578
Median	2696	1819	3195	3333
S.D.	1152	1577	1360	1468

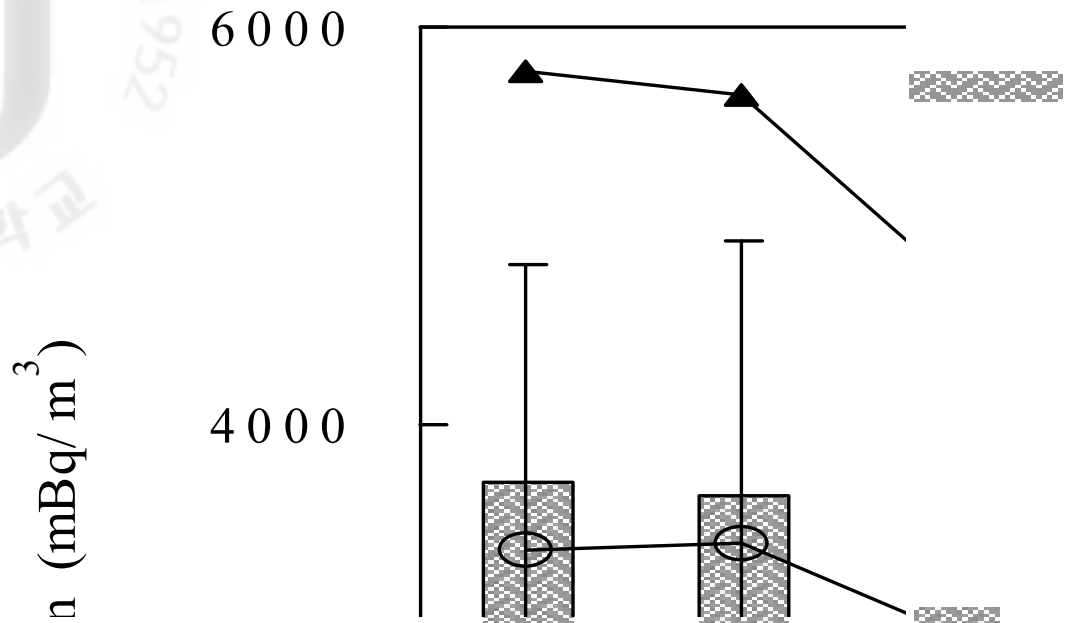


Figure 9. Monthly comparison of radon concentrations at Gosan site.

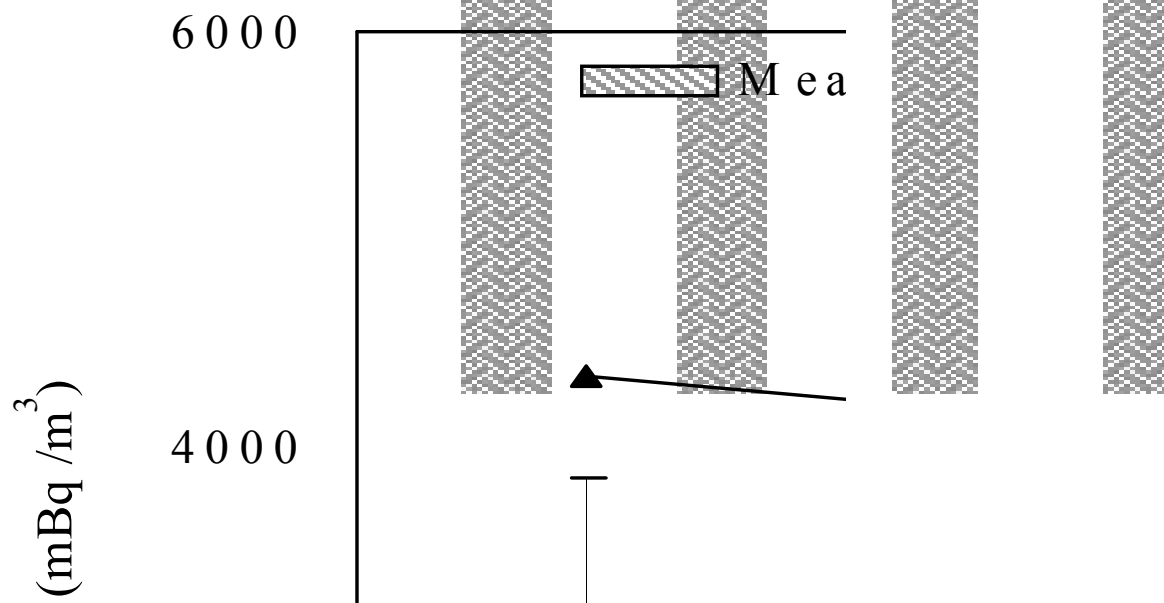


Figure 10. Seasonal comparison of radon concentrations between 2006 and 2008.

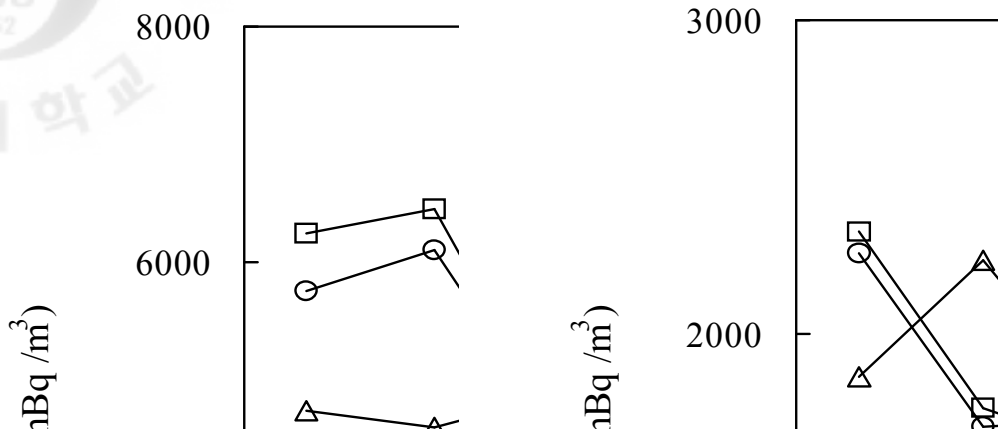


Figure 11. Monthly comparison of 90th percentile (left) and 10th percentile (right) of radon concentrations during 2006~2008.

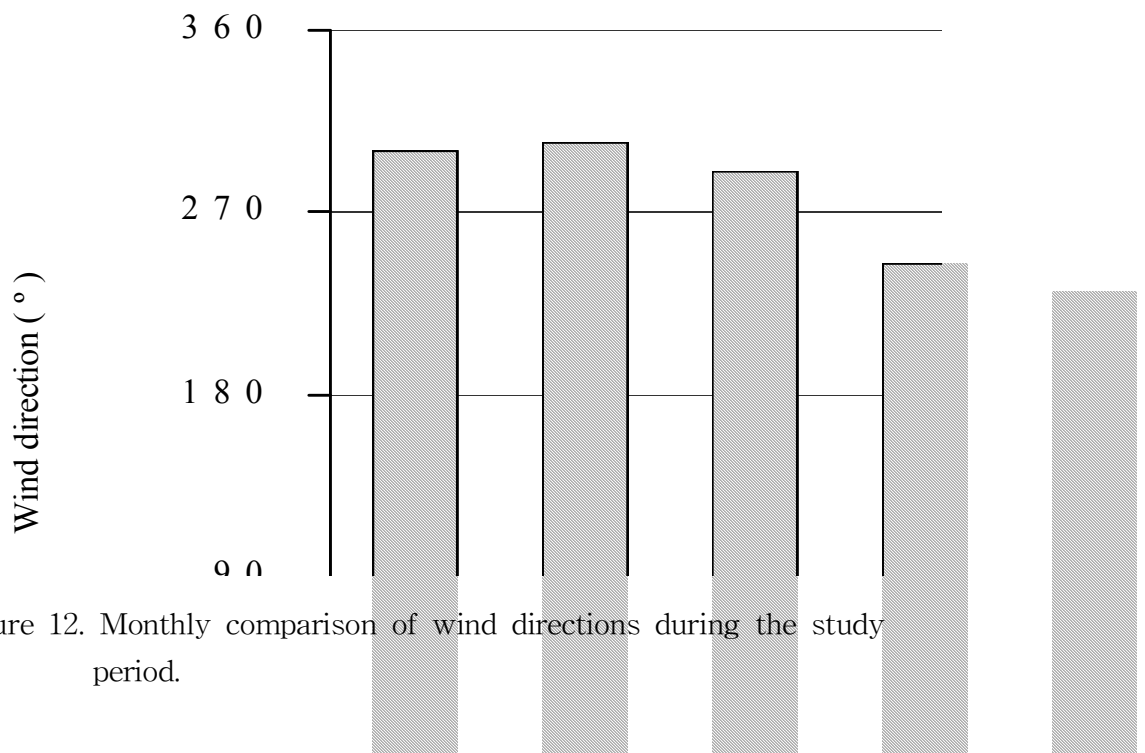


Figure 12. Monthly comparison of wind directions during the study period.

3) 시간별 농도 비교

3년간의 전체농도를 각 시간대별로 평균하여 그 결과를 Table 7와 Figure 13에 비교하였다. 비교한 결과, 오전 7시에 3356 mBq/m^3 로 24시간 중 가장 높은 농도를 보였고, 오후 3시경에 2536 mBq/m^3 로 가장 낮은 농도를 보였다. 대체적으로 야간에 높은 농도를 보이다가 주간에 낮은 경향을 나타내었다. 일간 변화 패턴을 확인해 보았을 때, 아침 시간부터 서서히 농도가 낮아지기 시작하여 오후 3시경까지 감소하고 다시 저녁시간에 농도가 상승하기 시작하여 밤이 되면 점차로 농도가 상승하는 추세를 보였다. 이러한 경향은 대기의 혼합고의 변화에 따른 것으로 추측된다. 혼합높이는 날씨가 맑을 때에는 늦은 오전이나 오후의 낮 동안에 최고값이 되어 대기 경계의 높이에까지 이르게 되고 이 높이이내의 대기오염물은 난류에 의해 균일하게 연직분포를 이루게 된다. 따라서 이때의 혼합높이는 상당혼합높이와 같아진다. 그러나 밤이나 이른 아침에는 지표 가까이에 안정된 복사역전층(radiation inversion layer)이 형성되며 이러한 경우에는 연직 혼합이 일어나지 않으므로 상당혼합높이는 역전층의 높이보다 낮아지게 된다(김의훈 등, 1985). 따라서 주간에 혼합고가 최대로 확장되어 라돈이 확산되므로 낮은 농도를 보이고, 야간에는 혼합고가 낮아져서 그만큼 라돈이 밀집되어 높은 농도를 보이는 것으로 추측된다. 월별, 계절별 농도 또한 시간별 농도와 마찬가지로 혼합고의 확장, 축소에 따른 라돈의 확산과 누적에 의해 월별, 계절별 농도 변화 영향을 주고 있다고 생각된다.

Table 7. Hourly mean concentrations of radon at Gosan site.

Time	Concentration (mBq/m ³)			Time	Concentration (mBq/m ³)		
	Mean	Median	S.D.		Mean	Median	S.D.
00:00	3183	3038	1557	12:00	2660	2567	1319
01:00	3209	3092	1567	13:00	2574	2483	1309
02:00	3231	3069	1565	14:00	2542	2450	1313
03:00	3243	3122	1563	15:00	2536	2426	1338
04:00	3268	3128	1562	16:00	2567	2420	1390
05:00	3288	3135	1543	17:00	2604	2477	1389
06:00	3332	3220	1580	18:00	2677	2571	1399
07:00	3356	3253	1595	19:00	2752	2637	1429
08:00	3309	3167	1570	20:00	2842	2716	1463
09:00	3139	3004	1514	21:00	2958	2813	1513
10:00	2959	2842	1478	22:00	3049	2893	1526
11:00	2783	2722	1393	23:00	3141	2990	1554

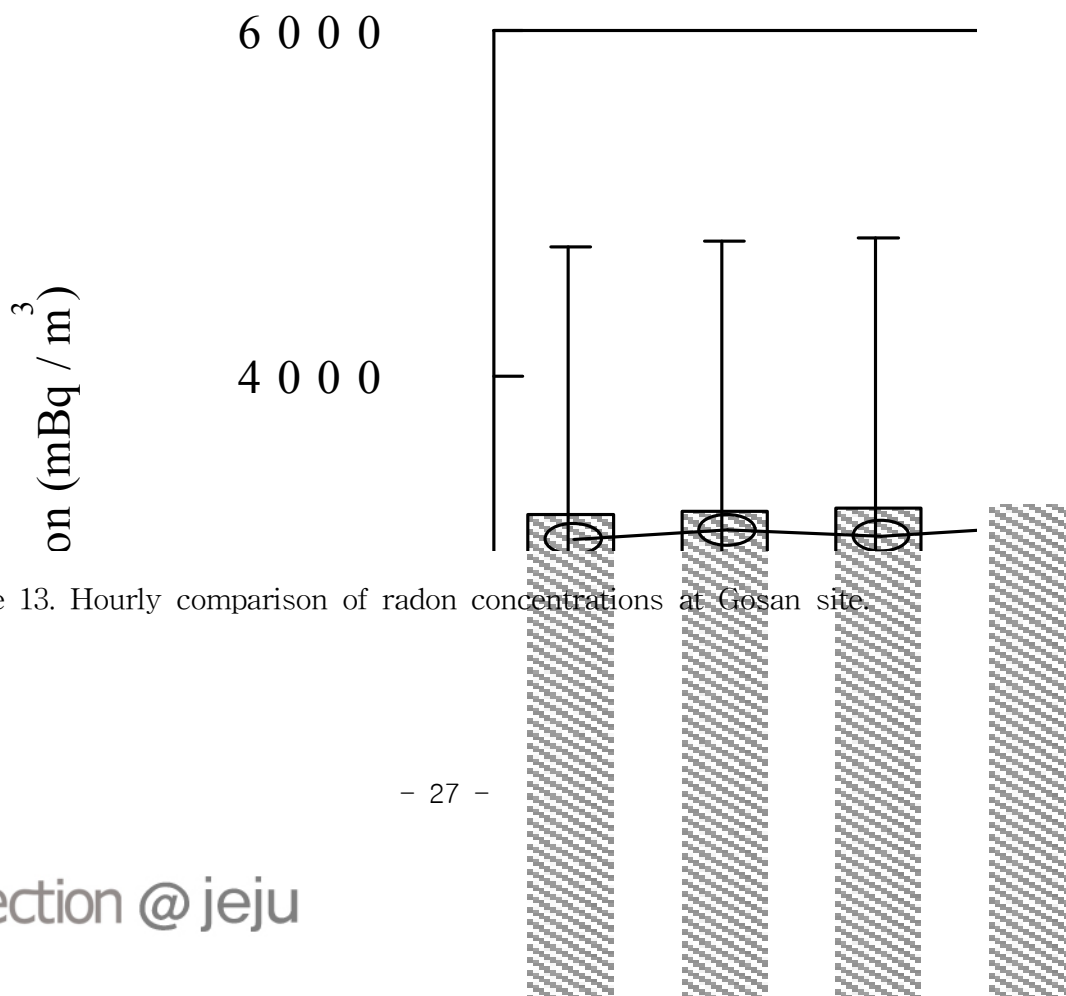


Figure 13. Hourly comparison of radon concentrations at Gosan site.

3. 라돈의 유입경로

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, 기단(air mass)의 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 , SO_2 , CO , O_3 등과 수명이 비슷하고 에어로졸의 대기 체류시간과도 유사한 수명을 보인다. 따라서 이들 대기오염물질의 대기 중에서의 이동경로를 파악하기 위한 추적자(tracer)로의 활용을 검토할 필요가 있다(Zahorowski *et al.*, 2005; 2004).

따라서 본 연구에서는 역궤적 분석(backward trajectory analysis)을 통하여 라돈의 유입 경로를 추적하였다. 2006년 1월부터 2008년 12월까지 측정된 라돈 데이터를 이용하여 이 중 일평균 농도가 높은 상위 10%와 상대적으로 농도가 낮은 하위 10%를 대상으로 역궤적 분석을 실시하여 기단의 이동 궤적을 조사하였다. 이를 위해 제주도를 중심으로 주변지역을 임의로 중국대륙(Sector I), 한반도(Sector II), 일본 및 동해(Sector III), 북태평양(Sector IV)의 4개 구역을 나누고, 역궤적 분석 결과를 기초로 제주도로 유입된 기단의 이동경로를 조사하였다.

역궤적 분석은 미국해양대기국(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 HYSPLIT4 (HYbird Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 이용하였다. 또한 역궤적 분석에 사용한 풍향, 풍속 자료는 NOAA의 북반구 FNL (FiNaL run at NCEP) 자료와 GDAS (Global Data Assimilation System)을 이용하였다. 또 중국대륙에서 발생한 대기오염물질의 경우, 대략 4일 이내에 한반도에 도달한다는 점을 감안하여 역궤적 분석의 모사시간은 5일(120시간)으로 설정하였고, 측정 지점의 좌표는 고산(33°28' N, 127°27' E)을 기점으로 선정하였다. 또 출발점 고도는 850 mb 면인 1500 m로 설정하였고, 출발시간은 해당 날짜의 매 00 KST를 기준으로 설정하였다(고희정, 2010; 국립환경과학원, 2007).

Latitude(°N)

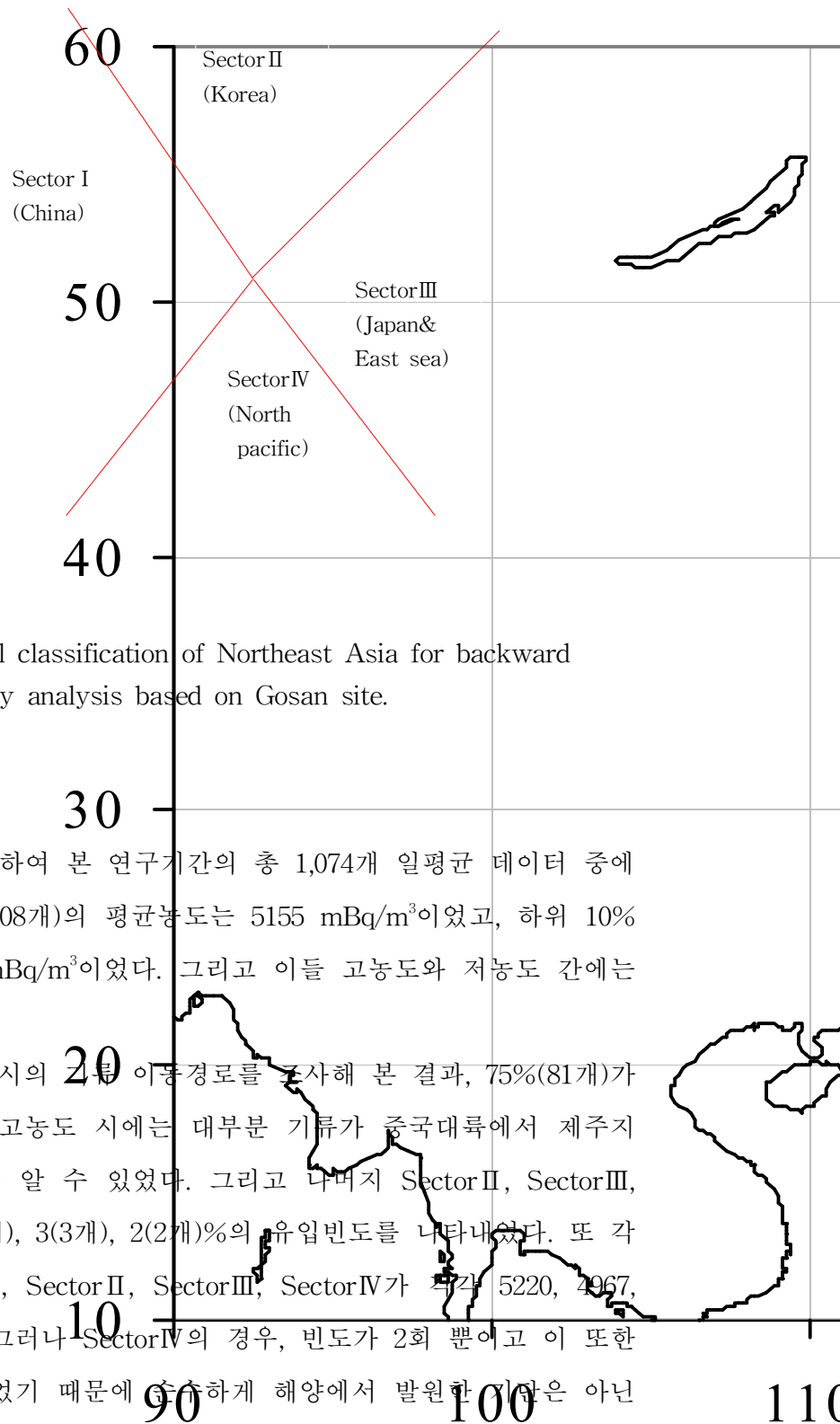


Figure 14. Sectoral classification of Northeast Asia for backward trajectory analysis based on Gosan site.

역례적 분석 결과를 이용하여 본 연구기간의 총 1,074개 일평균 데이터 중에서 농도가 높은 상위 10%(108개)의 평균농도는 5155 mBq/m³이었고, 하위 10%(108개)의 평균농도는 823 mBq/m³이었다. 그리고 이들 고농도와 저농도 간에는 약 6배의 차이를 나타내었다.

농도가 높은 상위 10% 시의 이동경로를 조사해 본 결과, 75%(81개)가 Sector I 으로부터 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. 또 각 구간별 평균농도는 Sector I, Sector II, Sector III, Sector IV가 각각 5220, 4967, 4703, 5234 mBq/m³이었다. 그러나 Sector IV의 경우, 빈도가 2회 뿐이고 이 또한 타 지역을 경유하여 유입되었기 때문에 순수하게 해양에서 발원한 기류는 아닌

것으로 판단된다. 따라서 이를 제외하면 대체적으로 Sector I 으로부터 기류가 이동하였을 때 가장 높은 농도를 나타내는 것으로 판단된다. 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 겨울철이 5251 mBq/m³ 정도로 가장 높고, 여름철이 4753 mBq/m³으로 낮은 수치를 나타내었다.

반면에 하위 10% 저농도를 대상으로 기류의 이동경로를 조사해 본 결과, 66%(71개)가 SectorIV에서 유입되었고, 대체적으로 북태평양의 해양에서 제주지역으로 기류가 이동하는 경향을 보였다. 그리고 나머지 Sector I, Sector II, SectorIII에서의 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(Table 8). 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(Table 9).

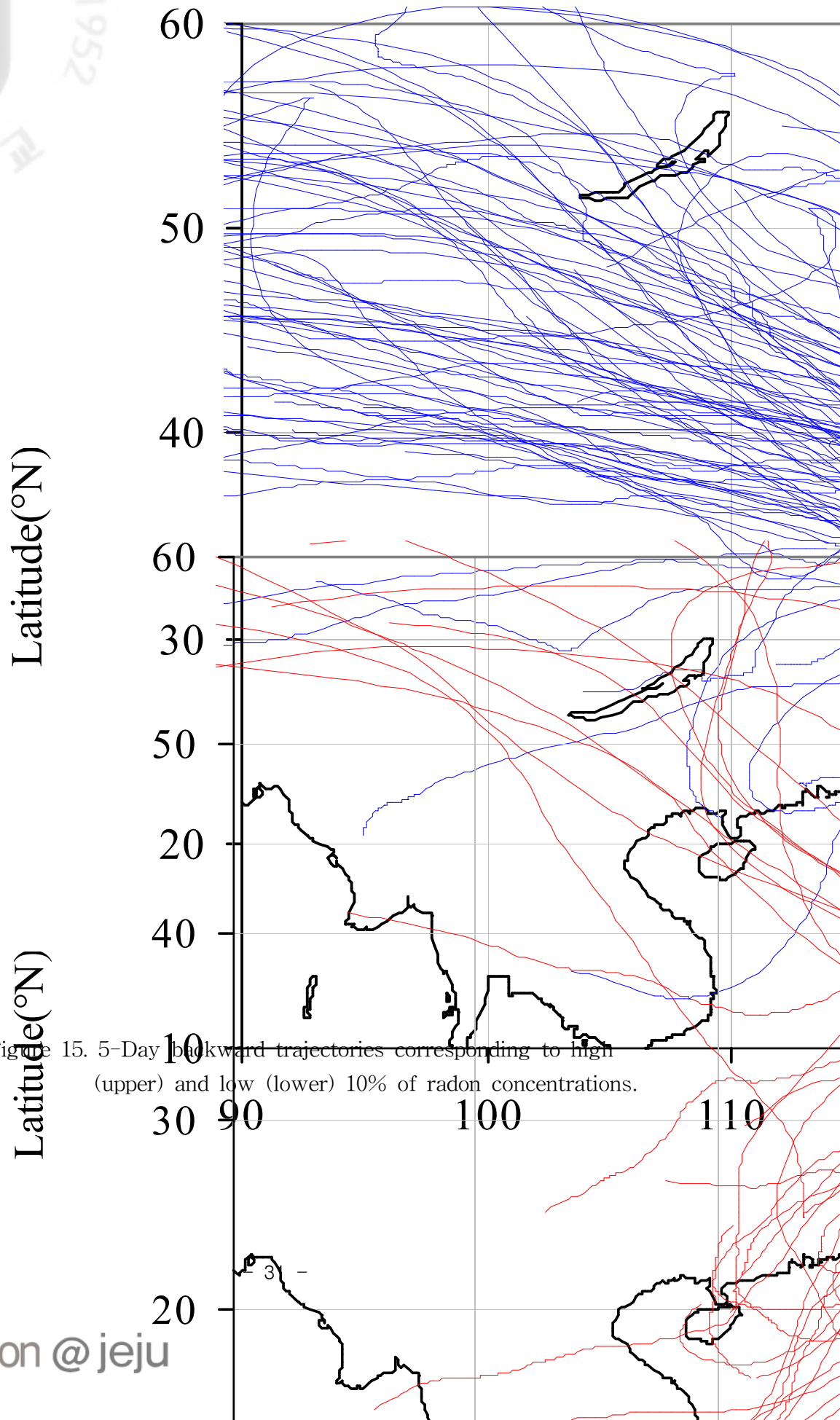


Figure 15. 5-Day backward trajectories corresponding to high (upper) and low (lower) 10% of radon concentrations.

Table 8. Sectional radon concentrations in accordance with high and low 10% of radon levels.

Radon Level	Concentration (mBq/m ³)			
	Sector I	Sector II	Sector III	Sector IV
High 10%	5220	4970	4703	-
Low 10%	969	1394	1115	710

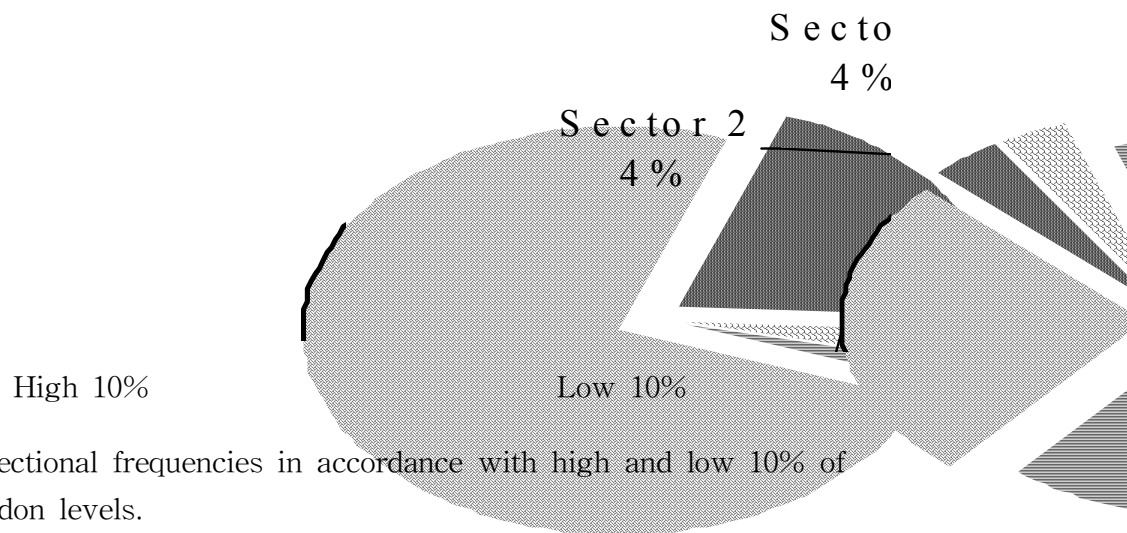
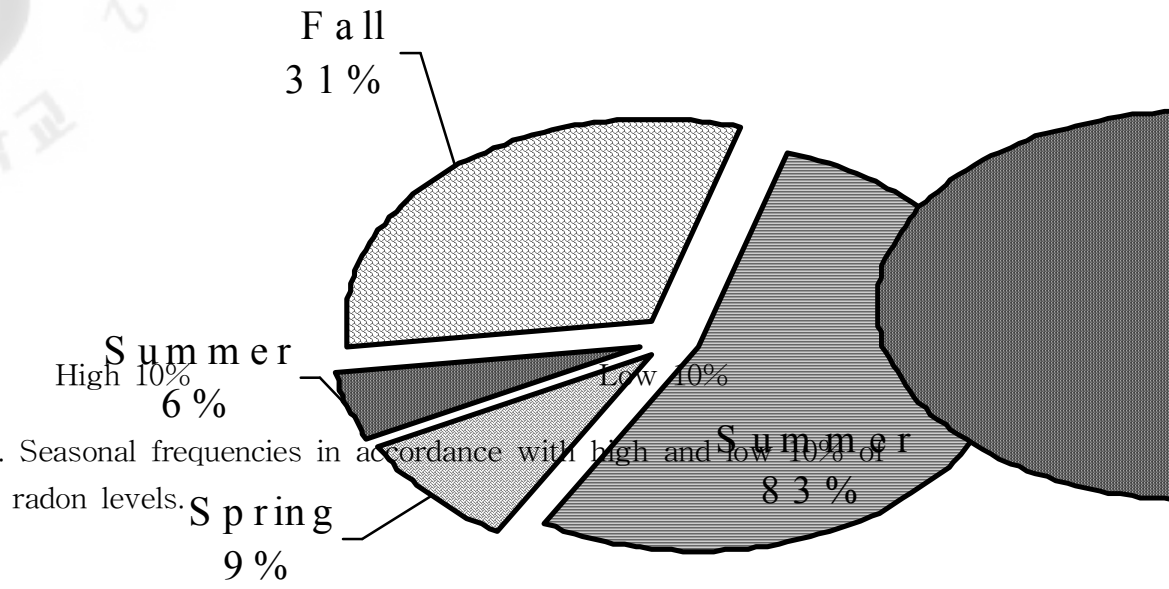


Figure 16. Sectional frequencies in accordance with high and low 10% of radon levels.

Table 9. Seasonal radon concentrations in accordance with high and low 10% of radon levels.

Radon Level	Concentration (mBq/m ³)			
	Spring	Summer	Fall	Winter
High 10%	4926	4753	5128	5251
Low 10%	1176	756	987	1439



4. 대기오염물질의 배경농도 모니터링

1) 대기오염물질의 발생 및 이동

급격한 산업화와 운송 차량의 증가로 대기오염이 심화되면서 대기질 개선에 대한 관심이 고조되고 있다. 최근 우리나라는 청정연료와 저유황연료 공급 확대, 저공해 자동차 보급 등 적극적인 대기오염 저감정책을 펴고 있다. 이러한 결과로 아황산가스(SO₂), 일산화탄소(CO) 등 일부 대기오염물질의 농도가 서서히 낮아지고 있고, 개도국형 오염상태는 상당 부분 개선되고 있는 추세에 있다. 그러나 아직도 도시지역을 중심으로 광화학스모그 발생, 시정거리 감소, 미세먼지(PM₁₀) 농도 상승 등 대기오염 현상이 빈번히 발생하고 있다. 특히 수도권 지역에서는 오존, 질소산화물, 미세먼지 등의 오염은 완만하게 증가하고 있어서 대기오염 형태가 개도국 형에서 선진국 형으로 전환되는 경향을 보이고 있다. OECD 국가의 주요 도시들과 비교했을 때, NO_x는 1.4~1.7배, 미세먼지는 1.7~3.5배 정도 더 높아 최하위 수준을 나타내고 있고 이에 대한 시급한 개선이 필요한 실정이다 (김신도 등, 2007). 따라서 정부에서는 '수도권 대기환경 개선에 관한 특별법'을 제정하여 이를 감시, 개선하는데 많은 비용과 노력을 경주하고 있다.

또한 우리나라에서는 '대기환경보전법' 제2조의 규정에 따라 대기오염의 원인이 되는 가스상 물질 또는 입자상물질을 대기오염물질로 지정하여 관리하고 있다. 현재 일산화탄소, 암모니아, 질소산화물, 황산화물 등 61종을 대기오염물질로 지정하고 있다. 대기오염물질 중에서 사람의 건강·재산이나 동·식물의 생육에 직접 또는 간접으로 피해를 줄 우려가 있는 물질을 특정대기유해물질로 지정하고 있으며, 다이옥신, 벤젠, 사염화탄소, 포름알데하이드 등 35종을 특정대기유해물질로 지정하고 있다(환경백서, 2008). 특히 이중에서도 SO₂, NO₂, O₃, CO, PM₁₀, Pb 등 6종을 주요 대기환경기준 오염물질로 지정하여 특별히 관리하고 있다 (대기환경연보, 2010).

우리나라와 인접한 중국은 급속한 산업화와 석탄 위주의 에너지 소비 구조로 매연형 위주의 대기오염 형태를 보이고 있다. 이로 인해 아황산가스 오염도가 높은 수준을 유지하고 있고, 또 최근에 도시화로 자동차 배출 오염물인 질소산화물

이 증가하면서 대도시는 매연형 오염과 광화학 오염이 혼합된 복합형 오염형태로 변화하고 있다. 더욱이 대규모 건축 등 인위적 활동으로 인한 먼지오염, 일부 지역의 생태파괴, 북방 지역의 황사 등으로 대기오염도가 급격히 심화되고 있다(H. Akimoto *et al.*, 2006). 중국 도시들은 아직까지 2/3 정도가 국가 2등급 대기질 기준에 도달하지 못하고 있고, 부유 먼지와 아황산가스의 오염이 매우 심각하게 나타나고 있다. 또 산성비 오염 역시 주로 남부지역에서 심각한 것으로 알려지고 있다(David G. Streets *et al.*, 2000). 2002년 기준으로 중국의 총 먼지 발생량은 941만 톤이며, 아황산가스는 도시의 77.6%가 국가 2등급, 22.4%가 국가 2등급 초과 수준을 나타나고 있다(차준석 등, 2006). 이렇게 중국에서 발생한 오염물질들은 대기층 하부의 산성침적물이나 광화학 산화물 등의 형태를 띠고, 평균 체류시간이 1일~1주일 정도로 알려져 있다. 그리고 이러한 오염물질들은 보통 수백~수천 km 까지 장거리 이동하기 때문에 인접 국가들에게는 커다란 관심사이다(한진석 등, 2006; M. Zhang *et al.*, 2004; P. Pochanart *et al.*, 2004). 특히 편서풍 풍하 지역에 위치한 우리나라는 이러한 영향을 가장 직접적으로 받고 있다. 우리나라의 대기환경 개선을 위해서는 국내의 대기오염물질 관리뿐만 아니라 외부로부터 유입되는 장거리 이동 대기오염물질에 대해 면밀히 조사할 필요가 있다(이용희 등, 2007).

동북아시아의 대기오염물질 장거리 이동현상을 규명하고 이에 대한 협력방안을 논의하기 위하여 한·중·일 장거리이동 대기오염물질 공동연구사업(LTP, Long-range Transboundary Air Pollutants in Northeast Asia)이 수행되고 있다. 2004년에 열린 이 회의에서는 중국 대련, 일본 오키, 제주도 고산 등 3국의 합의된 8개 지점과 서해안지역에서 지표 및 상층의 대기오염물질(SO₂, NO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5})을 공동 측정된 결과를 발표하였다. 이에 따르면 1998년 한 해 동안 우리나라에 침적되는 전체 황산화물 465,000 톤 중 약 20%에 해당하는 93,509.7 톤이 중국으로부터 한반도로 이동한 것으로 발표되었다(환경부, 2004).

이러한 기초 연구를 비롯하여 다양한 공동연구가 지속적으로 진행될 경우, 앞으로 동북아시아의 대기질 개선에 기여할 수 있는 결과와 방안이 마련될 수 있을 것으로 보인다. 또 이러한 대기오염물질의 장거리 이동 현상을 모니터링하기 위하여 국내에서도 안면도, 덕적도, 서해안 등의 몇몇 측정소를 활용하고 있고,

항공기를 이용한 서해안 관측을 실시하고 있다 (차준석 등, 2006). 또한 제주도 고산지역에서는 1991년 9월의 PEM-West A, 1994년 2월의 PEM-West B, 2001년에 수행된 ACE-Asia, ABC 등의 국제 공동프로젝트를 통해 대기오염물질의 장거리 이동 연구를 수행해오고 있다(Atmospheric Brown Clouds Gosan Campaign, 2007; 강창희 등, 2007; 송미정 등, 2006; 문광주 등, 2006; Kim *et al.*, 2005; Huebert *et al.*, 2003; Tu *et al.*, 2003; Bates *et al.*, 2002). 이처럼 제주도 고산측정소에서 측정된 대기질 데이터는 이러한 월경성 대기오염물질의 영향을 평가하기 위한 기초자료로 유용하게 활용될 수 있다. 따라서 고산지역의 지속적인 데이터 축적과 대기오염 특성을 파악하기 위한 노력을 기울여야 할 것으로 보인다.

2) 대기오염물질의 배경농도 및 시계열 변화

(1) 대기오염물질의 배경농도

가스상 대기오염물질은 대부분 화석연료의 연소에 기인하고 있다. 특히 화석연료의 연소에 기인하는 황화합물, 질소산화물 등의 1차 오염물질은 가스상으로는 물론 대기 중에서 광화학 반응을 거쳐 산성비 형태로 토양, 삼림, 호수 등의 생태계와 건축물 등에 피해를 입히고 있다 (류상범 등, 2008). 특히 동아시아지역은 높은 인구밀도와 최근의 급속한 산업화 정책으로 이러한 NO_x, SO₂, CO 등의 1차 오염물질의 배출량이 크게 증가하고 있는 것으로 알려지고 있다(Q. Zhang *et al.*, 2009; Akimoto *et al.*, 1996). 또 북반구 대류권의 O₃ 농도 역시 최근 수십년 간 꾸준히 증가 추세를 보이고 있다 (Vingarzan, 2004; Derwent *et al.*, 1998).

일반적으로 대기층 하부에 존재하는 산성 침적물이나 광화학 산화물 등은 평균체류시간이 1일~1주일로 알려져 있다. 그리고 이러한 오염물질들은 보통 수백~수천 km까지 장거리 이동(long-range transport)하여(김행범, 2011; Hatakeyama *et al.*, 2001), 국가 간의 민감한 환경오염문제로 부각될 수 있다. 우리나라는 동북아시아 동쪽 끝 지점의 중위도 편서풍 풍하 지역에 위치하고 있어서 중국과 아시아대륙으로부터 장거리 수송되는 각종 대기오염물질의 영향을 많이 받고 있다 (김행범, 2011; 한진석 등, 2005). 특히 중국의 동부 지역은 세계에서 가장 빠르게

산업화가 진행 중이며 상당한 양의 대기오염물을 배출하고 있다. 따라서 이러한 영향을 파악하기 위해서는 SO₂, NO₂, O₃, CO, PM₁₀ 등 주요 대기환경기준 오염물질을 중심으로 지속적인 모니터링이 이루어져야 한다.

1995년에 한국 측 제안으로 동북아지역 장거리 이동 대기오염물질의 협력방안을 논의하기 위하여 시작된 ‘한·중·일 장거리이동 대기오염물질 공동연구사업(LTP)’이 현재 지속적으로 수행되고 있다. 이 사업의 대표적인 지상 측정소로는 중국 대련, 일본 오키, 제주도 고산 등 3국의 합의된 8개 지점이며, 지표 및 상층에서 주요 대기오염물질(SO₂, NO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} 등)을 공동으로 측정해오고 있다.

본 연구에서는 환경부에서 운영 중인 제주도 고산 지구대기측정망에서 2006년 1월부터 2008년 12월까지 실시간으로 모니터링한 SO₂, NO₂, O₃, PM₁₀의 국내 배경농도의 시계열 특성을 조사하였다. 먼저 제주도 고산지역 대기오염물질의 연도별 평균농도를 국내 타 도시지역과 비교하였다. 그리고 그 결과를 Table 10~Table 14에 나타내었다. 3년 동안 제주도 고산과 타 지역의 대기오염물질 농도를 살펴보면, SO₂는 타 지역이 고산에 비해 2~4배 정도 높은 농도를 나타내는 것으로 조사되었다. 특히 비교 대상 지역들 중에서도 공단지역인 인천과 울산이 높은 농도를 나타내었다. NO₂ 농도 또한 타 지역들이 고산에 비해 6~10배 정도 높은 수준을 나타내어 가장 큰 차이를 보였다. 이는 고산지역이 대표적인 국내 배경지역인 반면, 비교 지역들이 모두 대도시나공단 지역이기 때문에 에너지 사용과 관련이 큰 NO₂이 더 큰 차이를 보이고 있다.

반면에 O₃의 경우, 다른 성분과 달리 오히려 서울, 부산, 대전과 같은 도시지역보다도 고산지역이 더 높은 농도를 나타내었다. 이러한 이유는 배경지역의 경우 지면의 안정으로 혼합도가 낮아 도시지역에 비해 일사량이 높은 특징을 보인다. 그리고 혼합층의 높이가 낮아 지면에서 발생한 오염물질이 상층까지 확산되지 않을 가능성이 있다. 또한 도시지역에 비해 NO_x 농도가 낮기 때문에 O₃ 농도는 도시지역과 다소 다른 농도 패턴을 보일 수 있고, 특히 해양 상층부 대기의 경우 이러한 O₃ 고농도 현상이 발생할 수 있다(대기환경연보, 2007). 고산지역의 O₃ 고농도 현상은 이러한 여러 요인이 복합적으로 나타난 결과로 추정된다.

CO는 부산과 울산을 제외한 타 지역과 비슷하거나 낮은 농도를 보였고 지역

간 편차는 상대적으로 낮게 나타났다. PM₁₀ 역시 타지역에 비해 낮은 농도를 보였고 특히 도시지역에서 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 농도를 보여 고산과는 큰 차이를 나타내었다.

Table 10. Yearly mean concentrations of SO₂ at Gosan and other urban areas.

	Concentration (ppb)							
	Gosan	Seoul	Busan	Daegu	Incheon	Gwangju	Deajeon	Ulsan
2006	2	5	6	6	7	4	4	7
2007	2	6	6	6	8	4	5	8
2008	2	6	6	5	7	4	4	8

Table 11. Yearly mean concentrations of NO₂ at Gosan and other urban areas.

	Concentration (ppb)							
	Gosan	Seoul	Busan	Daegu	Incheon	Gwangju	Deajeon	Ulsan
2006	4	36	23	23	29	24	20	22
2007	4	38	22	24	31	23	19	23
2008	3	38	22	24	30	22	20	24

Table 12. Yearly mean concentrations of O₃ at Gosan and other urban areas.

	Concentration (ppb)							
	Gosan	Seoul	Busan	Daegu	Incheon	Gwangju	Deajeon	Ulsan
2006	39	18	24	20	20	21	18	21
2007	37	18	24	21	22	22	17	21
2008	43	19	26	23	24	23	23	23

Table 13. Yearly mean concentrations of CO at Gosan and other urban areas.

	Concentration (ppm)							
	Gosan	Seoul	Busan	Daegu	Incheon	Gwangju	Deajeon	Ulsan
2006	0.6	0.6	0.4	0.6	0.6	0.7	0.7	0.4
2007	0.5	0.7	0.4	0.7	0.6	0.6	0.8	0.4
2008	0.5	0.6	0.4	0.6	0.6	0.5	0.6	0.5

Table 14. Yearly mean concentrations of PM₁₀ at Gosan and other urban areas.

	Concentration (µg/m ³)							
	Gosan	Seoul	Busan	Daegu	Incheon	Gwangju	Deajeon	Ulsan
2006	40	60	59	55	68	55	49	52
2007	47	61	57	53	64	52	49	53
2008	51	55	51	57	57	50	45	54

(2) 대기오염물질의 시계열 변화

제주도 고산지역에서 2006~2008년에 측정한 라돈과 대기오염물질(SO₂, NO₂, O₃, CO, PM₁₀)의 농도를 월평균, 90퍼센타일, 10퍼센타일로 구분하여 이를 월별로 비교하였다. Figure 18~Figure 23은 이러한 여러 오염물질의 농도변화를 월별로 비교한 시계열 그래프이다. 그림의 결과를 보면 라돈의 월별 농도는 대체적으로 1~2월에 가장 높게 상승하고 7~8월에 낮은 농도를 보이고 있다. 그리고 평균, 90퍼센타일, 10퍼센타일 모두 동일한 변화 추세를 나타내었다.

또한 SO₂는 Jan > Feb > Dec > Mar > Nov > Oct > May > Apr > Jun > Jul > Sep > Aug 순으로 높은 농도를 나타내었다. 그리고 1월과 2월에 각각 4.09, 3.73 ppb로 가장 높고, 8월과 9월에 각각 0.84, 0.89 ppb로 낮은 농도를 나타내었다. 이러한 월별 시계열 변화는 라돈의 월별 변화와 비슷한 경향으로 이는

라돈과 SO₂가 비슷한 유입경로를 통해 제주지역으로 이동했음을 암시한다. 특히 농도가 높은 90퍼센타일의 월별 변화가 라돈과 동일하게 1~2월에 가장 높고, 7~9월이 낮은 결과를 나타내는 것으로 보아 이러한 유입패턴을 잘 뒷받침해 주고 있다. NO₂는 Jan > May > Dec > Apr > Feb > Nov > Jun > Jul > Mar > Aug > Oct > Sep 순으로 높은 값을 보였으며, 1월이 5.04 ppb로 가장 높고 9월이 2.80 ppb로 가장 낮은 값을 나타내었고 약 1.8배의 차이를 보였다. 또 NO₂의 90퍼센타일 농도가 라돈, SO₂과 함께 1월과 2월에 높은 것으로 보아 이 시기에 대륙으로부터 이동한 기류의 영향으로 이들 세 성분들이 동시에 농도가 상승한 것으로 추정된다. 그리고 이는 장거리 이동 오염물질이 제주지역 대기질에 영향을 미치고 있을 가능성이 있음을 의미한다. 반면에 O₃는 4월, 5월, 10월, 11월에 높은 농도를 보이고 1~2, 7~8월에 낮은 농도를 보여 라돈과는 오히려 상반된 시계열 변화추이를 나타내었다. 또 다른 성분들과 달리 월평균, 90퍼센타일, 10퍼센타일 모두 아주 유사한 변화 패턴을 보이는 특징을 나타내었다. 또 CO는 Jan > Nov > Apr > Aug > Mar > Feb > Sep > Jul > Dec > Oct > May > Jun 순으로 높은 농도를 보였다. 그리고 1월에 0.63 ppm으로 가장 높은 농도를 보였고, 6월에 0.47 ppm으로 가장 낮은 수치를 나타내었으며, 다소 불규칙한 월별 변화 패턴을 보였다. 또 다른 성분들에 비해 월평균, 90퍼센타일, 10퍼센타일이 서로 달라 특징적인 추세를 추정하는데 어려움이 있었다. PM₁₀은 Apr > Mar > May > Feb > Nov > Dec > Oct > Jan > Jul > Jun > Aug > Sep 순으로 높은 농도를 보였다. 그리고 라돈과 비슷하게 2월에 46.50 µg/m³로 상대적으로 높고 8월에 33.82 µg/m³로 가장 낮은 경향을 보였다. 그러나 라돈, SO₂, NO₂와 크게 다른 특징은 3월과 4월에 PM₁₀ 농도가 각각 61.47, 71.95 µg/m³까지 높게 상승하고 최소 농도와 1.8~2.1배 정도의 차이를 보였다. 이러한 경향은 월평균, 90퍼센타일, 10퍼센타일 모두에서 정도의 차이는 있지만 비슷한 패턴을 보이고 있다. 이렇게 4~5월에 입자상 오염물질의 농도가 급격하게 상승하는 것은 봄철 황사가 영향을 미쳤기 때문으로 추정된다.

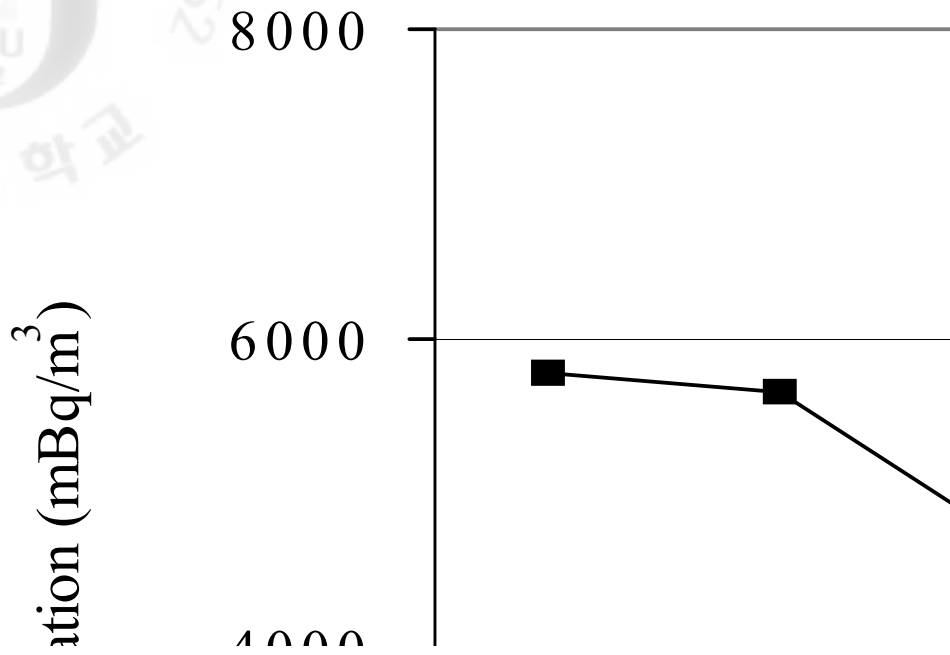


Figure 18. Monthly comparison of radon concentration at Gosan site.

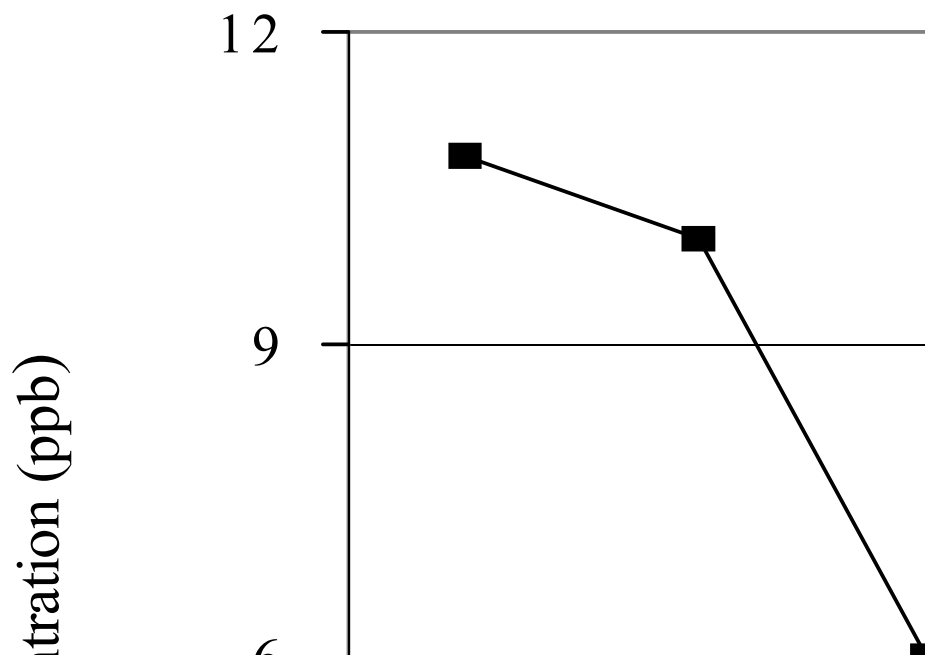


Figure 19. Monthly comparison of SO₂ concentration at Gosan site.

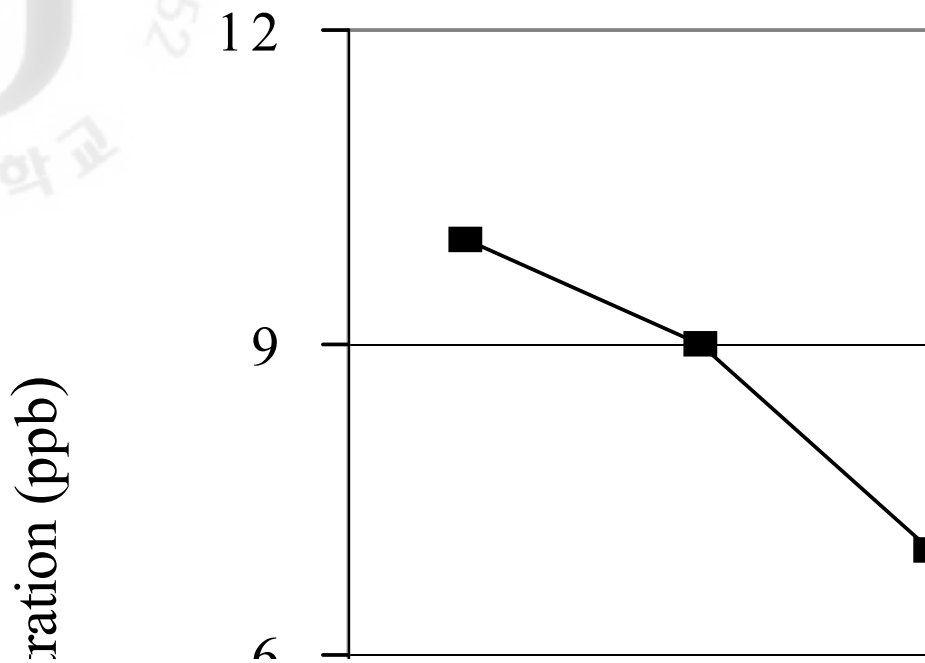


Figure 20. Monthly comparison of NO₂ concentration at Gosan site.

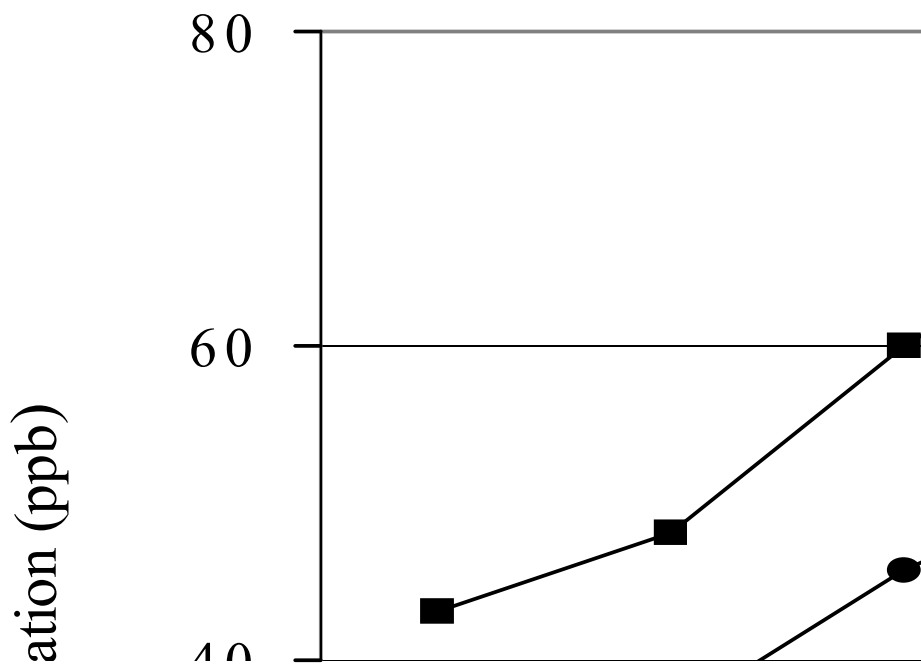


Figure 21. Monthly comparison of O₃ concentration at Gosan site.

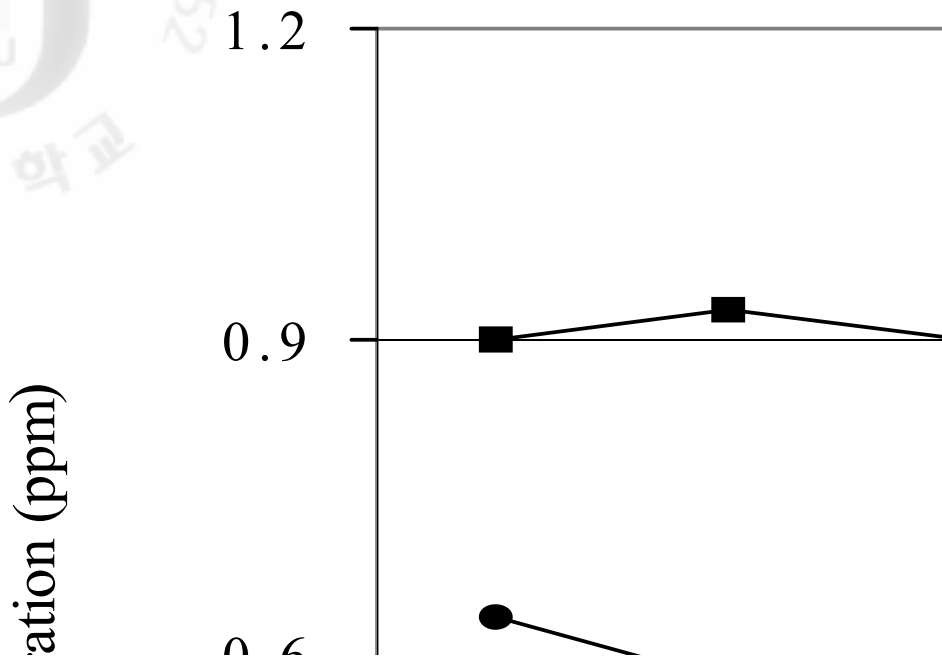


Figure 22. Monthly comparison of CO concentration at Gosan site.

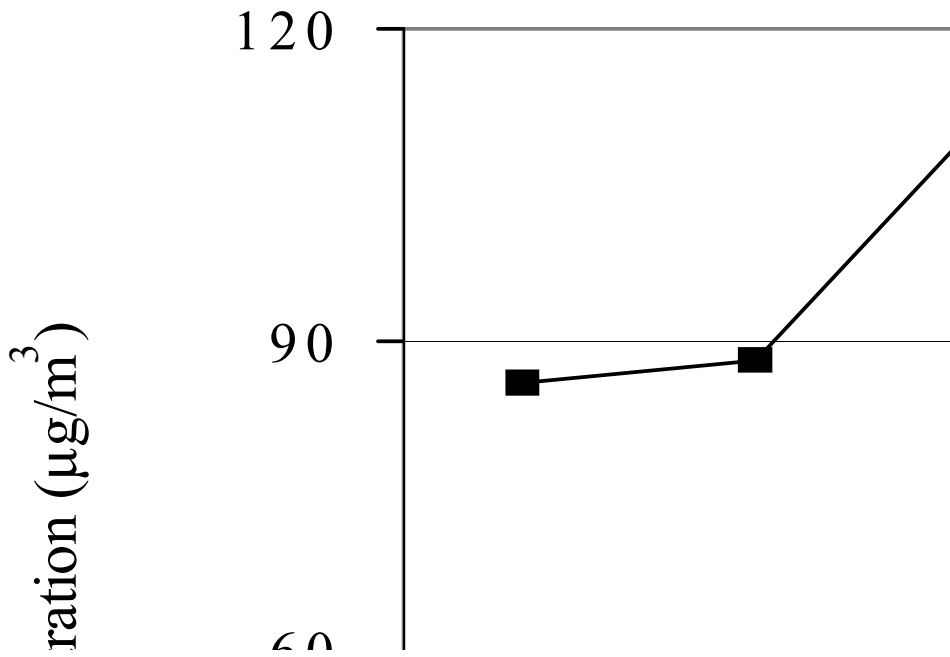


Figure 23. Monthly comparison of PM₁₀ concentration at Gosan site.

또한 연구 기간에 라돈과 대기오염물질의 일간 농도변화를 계절별로 나누어 Figure 24~Figure 29에 비교하였다. Figure 24의 결과와 같이 라돈은 겨울, 가을, 봄, 여름 순으로 높은 농도를 나타내었고, 주간에 비해 야간이 다소 높은 농도를 보였다. 하루 중에는 오전 7~8시경에 가장 높고, 오후 2~3시경에 가장 낮은 경향을 보였고, 이러한 편차는 전체적으로 농도가 더 낮은 여름철에 더 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 이러한 이유는 혼합고 높이 차이에 기인하는 것으로 보이며, 혼합고 높이 변화가 큰 여름철에 더 큰 차이를 보이고 있다.

또한 SO₂의 경우 겨울철에 3.56 ppb로 높은 농도를 보였으며, 다음으로 봄, 여름, 가을철에 각각 1.98, 1.13, 1.74 ppb로 1.8~3.2배 더 높은 차이를 보였다. 하루 중 농도 변화는 오전 8시부터 증가하여 오전 11시~오후 1시에 최고 농도를 보였고, 겨울철에 이러한 변화가 더 뚜렷하게 나타나는 것으로 확인되었다. 이러한 경향은 도시지역의 변화 패턴과는 확연히 다른 현상으로 배경지역 대기질의 특징으로 판단된다. NO₂는 겨울철이 4.36 ppb로 가장 높고 가을철이 3.15 ppb로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 시간별로는 오후 7시~9시에 높은 농도를 보이고 다음으로 오전 9시~11시경에 높은 경향을 나타내었다. 이는 SO₂와는 다른 경향으로 이들 두 성분이 다른 배출원에 의해 발생되고 있음을 의미한다. O₃은 봄철에 50.3 ppb로 가장 높은 농도를 보이고, 여름철에 31.0 ppb로 낮은 농도를 나타내었다. 이처럼 여름철에 O₃ 농도가 낮은 것은 습도, 강우 등의 영향으로 습윤, 침적되기 때문으로 추정된다. 일반적으로 O₃는 대기 광화학반응의 산물로 기온이 높을수록 생성이 빨라진다. 고산지역에서는 오전 7~8시경에 낮은 농도를 보이고, 오후 4시경에 높은 농도를 나타내었고 라돈과는 서로 상반된 경향을 나타내었다. 오후에 높은 농도를 보이는 이유는 일사량이 많은 오후에 광화학반응이 활발해져 O₃의 생성이 촉진되기 때문으로 판단된다. 그리고 도시지역에서는 출퇴근 시간대에 O₃ 농도가 낮은 경향을 보이는데, 이는 NO 등의 1차 오염물질이 O₃에 의해 산화반응을 일으키기 때문인 것으로 알려져 있다(주옥정 등, 2006; 김영성 등, 2003). CO의 경우, 계절별로 0.54~0.58 ppm의 범위를 나타내어 계절 간 농도 차가 큰 편차를 보이지 않았다. 시간별 변화는 야간에 높고 주간에 낮은 경향을 보였고, 오전 6시경에 최고 농도, 오후 3시에 농도를 나타낸다. 이는 O₃과는 서로 상반된 농도변화 패턴으로 도시지역과 다른 추세이며, 국지 배출원이 없고

청정지역인 고산의 특징으로 보인다. PM_{10} 은 봄철이 1.4~1.7배 정도 훨씬 높은 농도를 보이고 다음으로 겨울, 가을, 여름 순으로 높게 나타났으며 이러한 봄철의 농도 상승은 황사의 영향에 기인하는 것으로 보인다. 그리고 일간 변화는 봄철 야간에 다소 높은 경향을 보이지만 그 외에는 큰 변화를 보이지 않았으며, 다른 성분들에 비해 일간별 편차가 별로 크지 않는 것으로 확인되었다.

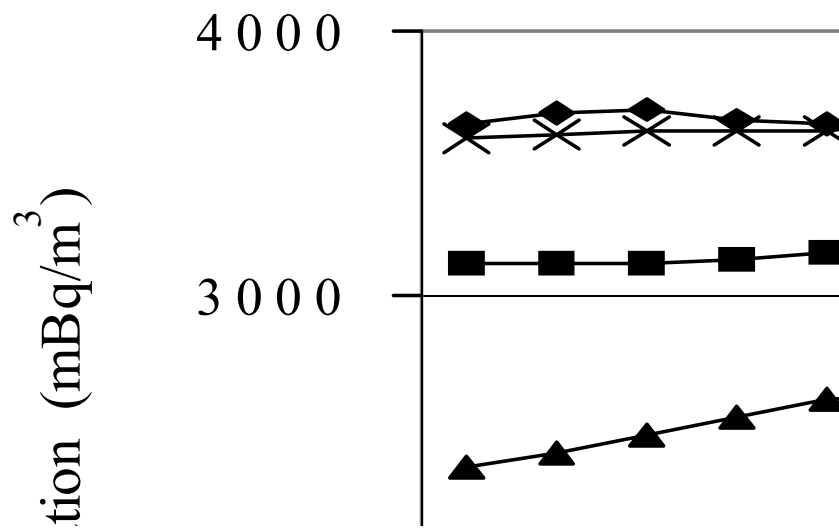


Figure 24. Seasonal comparison of hourly radon concentration at Gosan site.

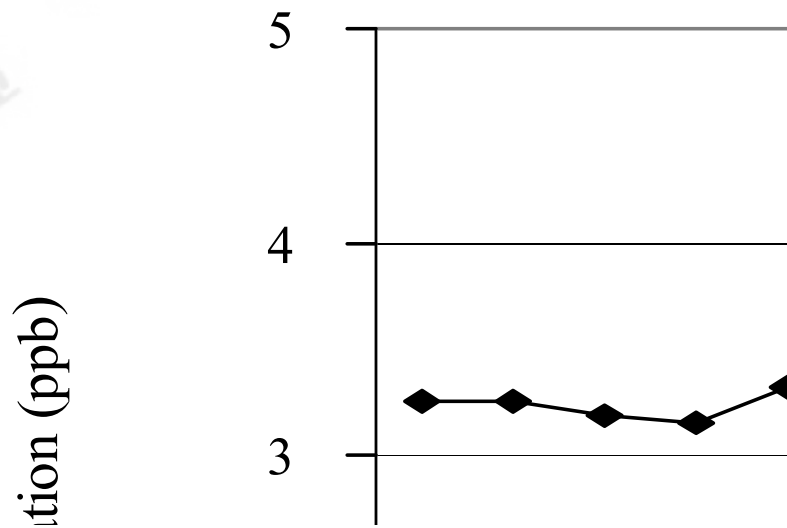


Figure 25. Seasonal comparison of hourly SO₂ concentration at Gosan site.

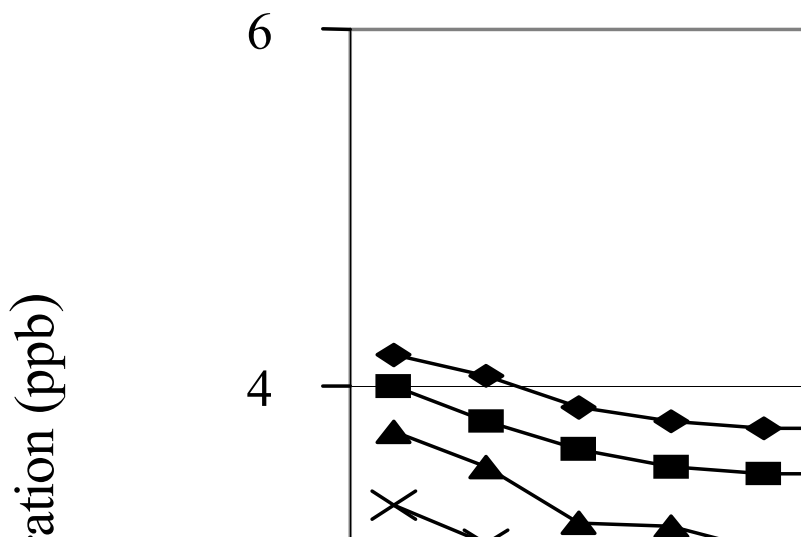


Figure 26. Seasonal comparison of hourly NO₂ concentration at Gosan site.

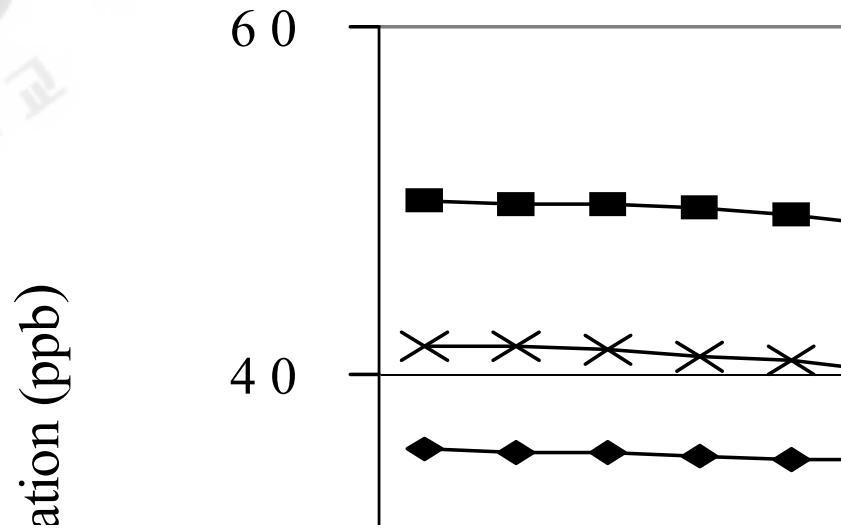


Figure 27. Seasonal comparison of hourly O₃ concentration at Gosan site.

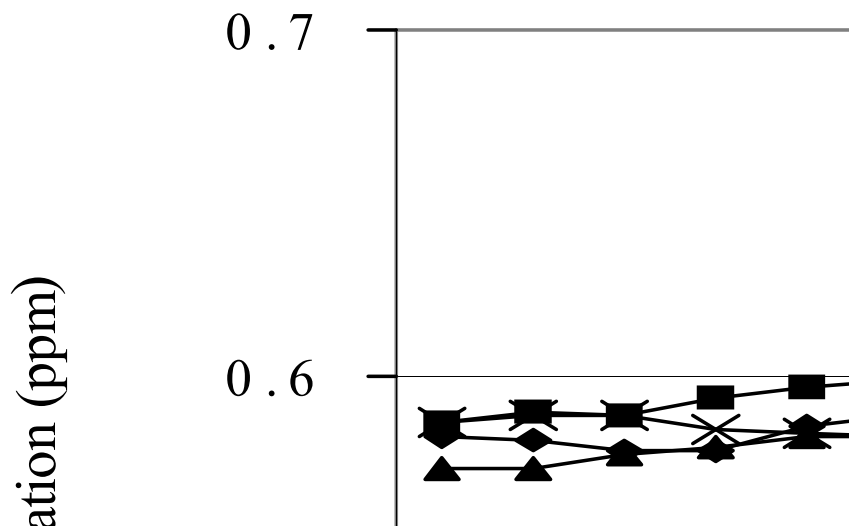


Figure 28. Seasonal comparison of hourly CO concentration at Gosan site.

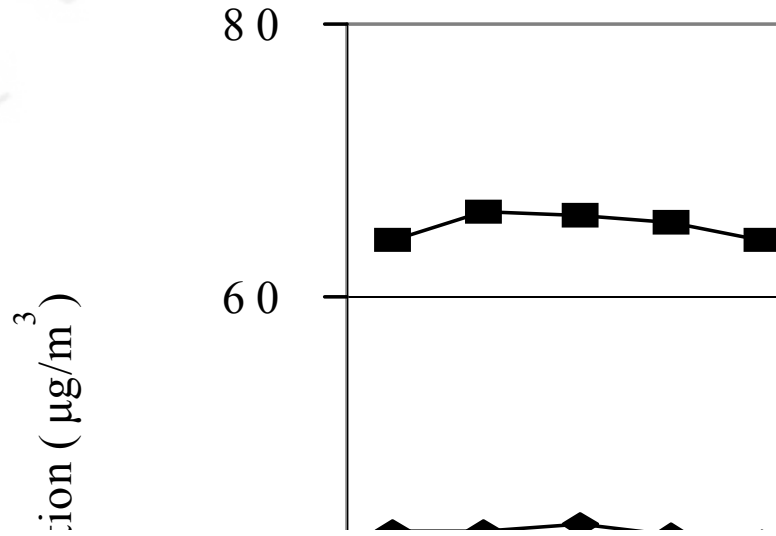


Figure 29. Seasonal comparison of hourly PM₁₀ concentration at Gosan site.

5. 라돈과 대기오염물질의 상관성

본 연구지역에서 측정된 라돈이 다른 주요 대기오염물질들과 어떠한 관련성을 나타내는지 알아보기 위하여 라돈농도(시간평균) 데이터를 계절별로 크게 상위 25%, 중간 50%, 하위 25%를 구분하였다. 그리고 이와 동일한 시점의 대기오염물질 각각의 농도를 라돈 농도와 상호 비교하였다. 그리고 이렇게 비교한 결과를 Table 15에 수록하였다. 또한 이렇게 구한 농도를 계절별로 분리하여 Figure 30~35에 비교하였다.

먼저 Table 15와 Figure 30~31의 결과를 보면, 라돈 농도가 상위 25% 일 때 SO_2 의 농도 역시 1.2~5.3 ppb로 높은 수치를 보였고, 라돈 농도가 하위 25% 일 때는 SO_2 농도가 1.0~1.7 ppb로 낮은 수치를 나타내었다. 이러한 경향은 여름철을 제외한 봄, 가을, 겨울에 동일한 변화 패턴을 보였고, 이로부터 라돈과 SO_2 는 유사한 농도변화 특성을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 계절별로는 겨울철에 이러한 경향이 더 뚜렷하게 나타났고, 농도가 높을수록 서로 더 잘 일치하는 결과를 나타내었다.

또 NO_2 에 대해 SO_2 와 동일한 방법으로 라돈과의 상관성을 조사해 본 결과, 라돈 농도가 상위 25%일 때 NO_2 농도가 4.4~6.8 ppb로 더 높고 라돈 농도가 하위 25%일 때는 NO_2 농도가 2.1~3.2 ppb로 낮은 수치를 보였다. 그리고 전 계절에 걸쳐서 라돈 농도가 높을 때 NO_2 농도도 함께 상승하는 추세를 보였다. 또 상위 25%, 중간 50%, 하위 25% 간의 계절별 편차 역시 농도가 가장 높은 겨울철에 농도 차가 더 크고, 상대적으로 봄철에는 그 편차가 작은 특징을 나타내었다. 반면에 O_3 의 경우에는 라돈 농도가 상위 25%일 때 33.4~47.7 ppb, 중간 50%일 때 35.4~52.1 ppb, 하위 25%일 때 18.4~49.7 ppb로 SO_2 , NO_2 와 달리 라돈 농도와 무관한 농도변화를 나타내었다. 그리고 계절별로도 구분한 비교 결과에서도 라돈과의 상관성은 전혀 관찰되지 않아서 라돈과 O_3 과는 서로 무관한 농도 변화를 나타내고 있음을 알 수 있었다. 또한 CO의 경우를 보면, 라돈 농도가 상위 25%일 때 CO 농도가 0.6~0.7 ppm, 중간 50%일 때 0.5~0.6 ppm, 라돈 농도가 하위 25%일 때는 CO 농도가 0.5 ppm으로 전 계절에 걸쳐서 라돈 농도가 높을 때 CO 농도도 함께 상승하는 추세를 보였다. 그리고 다른 성분들에 비해

그 편차는 그리 크지 않지만 CO 역시 라돈의 농도변화와 동일한 패턴으로 농도가 변하고 있음을 확인하였고 서로 상관성이 있음을 알 수 있었다.

또한 PM₁₀과 라돈과의 상관성을 동일한 방법으로 조사해 본 결과, 라돈농도가 상위 25%일 때 PM₁₀은 41.9~89.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 중간 50%일 때 35.1~56.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 하위 25%일 때 27.5~43.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위를 나타내었다. 그리고 전 계절에 걸쳐서 라돈 농도가 높을 때 SO₂, NO₂, CO와 같이 PM₁₀ 농도도 함께 상승하는 동일한 변화 추세를 보였다. 이러한 현상은 농도가 높은 봄철에 더 큰 편차를 나타내었고, PM₁₀과 라돈은 서로 상관성이 큰 것으로 확인되었다.

Table 15. Concentration of air pollutants corresponding to high (25%), medium (50%), and low (25%) radon levels.

Season	Radon (mBq/m ³)	SO ₂ (ppb)	NO ₂ (ppb)	O ₃ (ppb)	CO (ppm)	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
Spring	high	4413	2.7	4.4	47.7	0.6	89.8
	medium	2678	1.9	4.1	52.1	0.6	56.6
	low	1522	1.3	3.2	49.7	0.5	43.7
Summer	high	4296	1.2	4.7	34.5	0.6	41.9
	medium	1882	1.2	3.2	35.4	0.5	35.1
	low	421	1.0	2.6	18.4	0.5	27.5
Fall	high	5114	2.2	4.4	42.0	0.6	50.7
	medium	3214	1.7	3.2	43.5	0.6	39.2
	low	1821	1.2	2.1	38.8	0.5	33.0
Winter	high	5597	5.3	6.8	33.4	0.7	59.6
	medium	3407	3.6	4.0	36.3	0.5	43.6
	low	1943	1.7	2.7	36.0	0.5	30.7

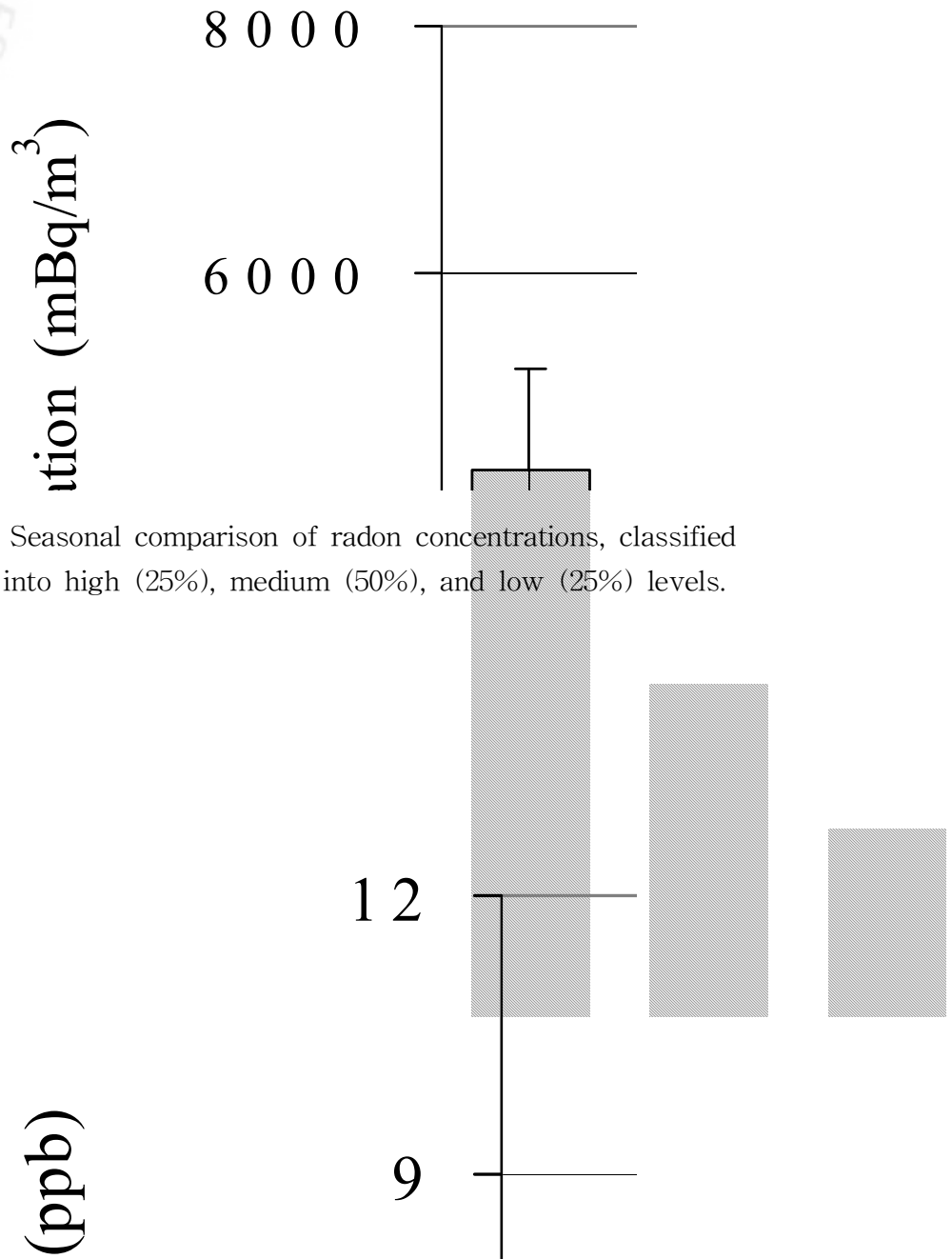


Figure 30. Seasonal comparison of radon concentrations, classified into high (25%), medium (50%), and low (25%) levels.

Figure 31. Seasonal comparison of SO₂ concentrations corresponding to high (25%), medium (50%), and low (25%) radon levels.

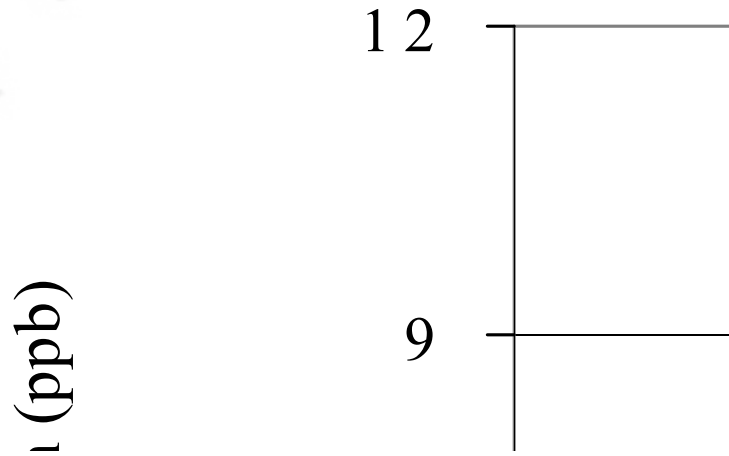


Figure 32. Seasonal comparison of NO₂ concentrations corresponding to high (25%), medium (50%), and low (25%) radon levels.

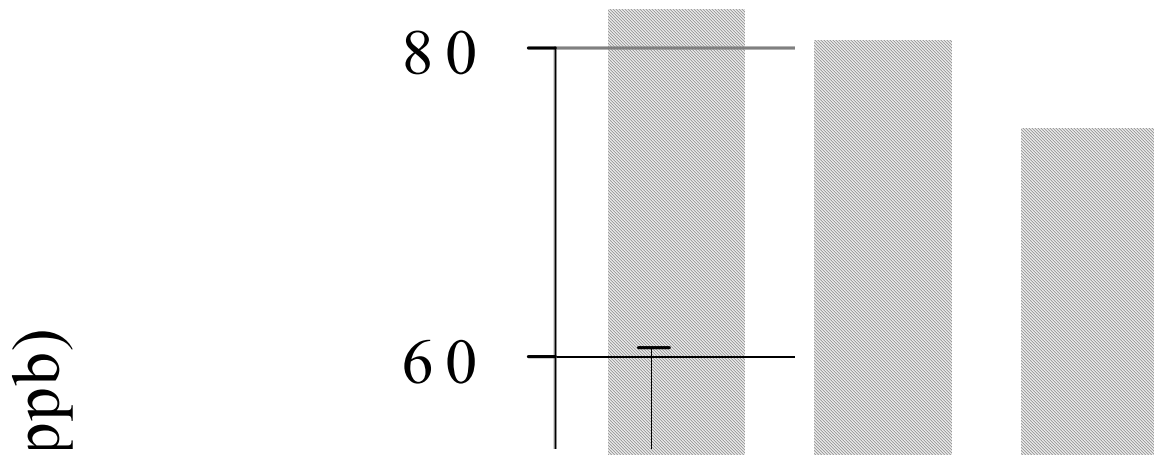


Figure 33. Seasonal comparison of O₃ concentrations corresponding to high (25%), medium (50%), and low (25%) radon levels.

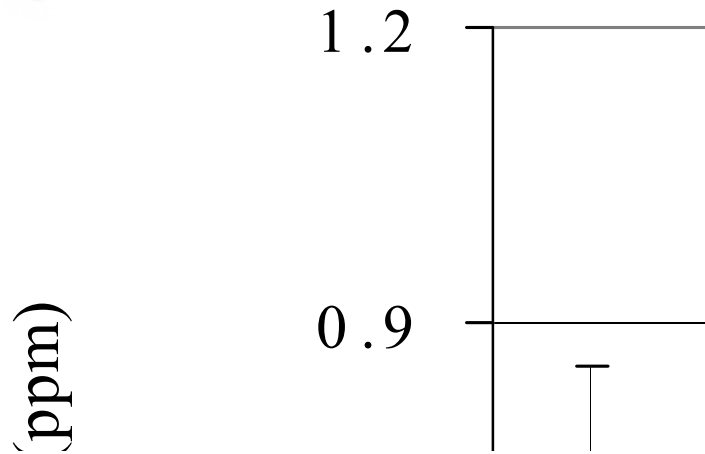


Figure 34. Seasonal comparison of CO concentrations corresponding to high (25%), medium (50%), and low (25%) radon levels.

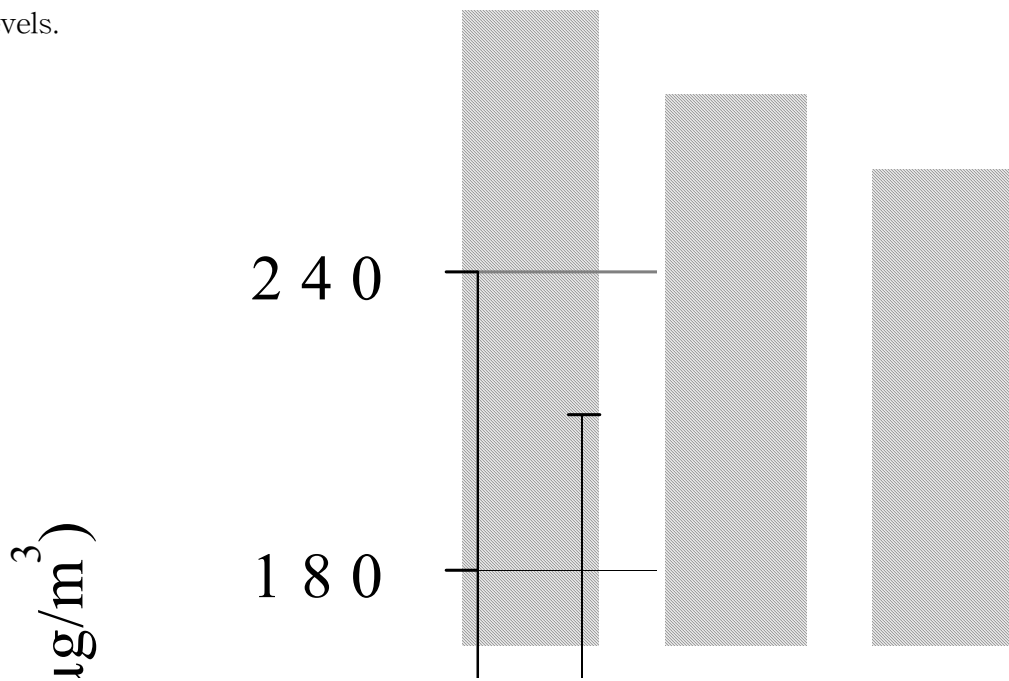


Figure 35. Seasonal comparison of PM₁₀ concentrations corresponding to high (25%), medium (50%), and low (25%) radon levels.

6. 풍향별 농도 비교

1) 풍향별 대기오염물질의 농도 비교

풍향에 따른 대기오염물질의 농도변화를 비교해 보기 위한 목적으로 제주지역을 중심으로 주변 구역을 5개 구간으로 구분하여 각 구간별 농도를 조사하였다. 풍향별 구간은 중국대륙을 포함한 북서($225^{\circ} \sim 337^{\circ}$) 방향을 Sector 1, 한반도($337^{\circ} \sim 45^{\circ}$) 방향을 Sector 2, 동해와 일본($45^{\circ} \sim 135^{\circ}$) 방향을 Sector 3, 북태평양($135^{\circ} \sim 225^{\circ}$) 방향을 Sector 4, 제주도 국지 풍향을 Local로 구분하였다. 이 때 풍향 및 풍속은 기상청에서 관측한 시간별 자료를 이용하였고, 제주도 국지 풍향은 풍속이 2 m/s 이하로 정체된 경우를 'Local'로 정의하였다.

이렇게 각 구간별로 분류한 후 대기오염물질 각각의 농도를 계절별로 평균한 결과를 이용하여 풍향별 대기오염물질들의 농도를 상호 비교하였다. 이렇게 비교한 풍향별 농도를 보면, SO_2 는 Sector 1의 풍향일 때 봄, 여름, 가을, 겨울의 농도가 각각 2.6, 1.2, 2.0, 4.8 ppb로 가장 높은 수치를 보였다. 그리고 Sector 3과 Sector 4에서는 모든 계절에 1.0~2.9 ppb 범위를 나타내어 Sector 1보다는 더 낮은 농도를 보였다. 이러한 결과로 보아 SO_2 는 중국대륙으로부터 기류가 이동하였을 때 농도가 가장 높고, 중국의 풍하 측에 위치한 우리나라는 이러한 장거리 이동 오염물질의 영향을 많이 받고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 이와 달리 NO_2 는 국지 풍향(Local)일 때 3.9~6.2 ppb, Sector 3에서 3.7~6.0 ppb로 계절별로 다소 차이가 있지만 일본과 동해, 그리고 국지 풍향일 때 오히려 높고 이외의 다른 풍향일 때 이보다 더 낮은 농도를 나타내어 SO_2 와는 다른 결과를 나타내었다. 이는 동해와 제주지역이 대륙에 비해 훨씬 더 청정한 대기질을 유지하고 있어서 예상과는 크게 상이한 결과로 좀 더 심층적인 조사가 필요해 보인다. 그 이유 중 하나로 고산측정소가 72 m 높이 절벽에 위치하고 있기 때문에 근처에서 발생하는 와류의 영향으로 풍향이 다르게 관측되었을 개연성도 있어 보인다. O_3 는 대체적으로 Sector 1에서 37.1~55.4 ppb로 높은 농도를 보였으나, 여름철에 Sector 2의 풍향일 때 38.8 ppb로 Sector 1보다 높게 나타났다. 전체적으로는 봄철에 Sector 1 풍향일 때 55.4 ppb로 가장 높은 농도를 나타내었고, 여름철

Sector 4 풍향일 때 26.3 ppb로 가장 낮은 농도를 보였다. CO의 농도는 대체적으로 0.5~0.7 ppm 범위를 보였고, 이 중 겨울철 Sector 1 풍향일 때가 0.7 ppm으로 가장 높은 농도를 나타내었다. 또한 4계절 중 Sector 1 풍향일 때가 0.6~0.7 ppm으로 비교적 높고 나머지 풍향에서는 서로 비슷한 차이를 보였으며, 다른 대기 오염물질들에 비해 풍향별로 비교적 적은 편차를 보였다.

PM₁₀은 4계절 모두 Sector 1 풍향일 때 가장 높은 농도를 나타내었고, 이 때의 농도 범위는 38.9~70.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 대체적으로 Sector 3과 Sector 4 풍향에서는 33.7~54.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮은 수치를 나타내었고 특히 여름철 제주지역 정체 풍향일 때 PM₁₀ 농도가 33.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최저치를 보였다. 또한 봄철 Sector 1 풍향일 때의 PM₁₀ 농도가 53.6~70.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위의 아주 높은 수치를 나타내었는데 이는 황사의 영향으로 토양성분들이 다량으로 유입되었기 때문인 것으로 판단된다.

Table 16. Seasonal and sectional concentrations of air pollutants.

Season	Sector	SO ₂ (ppb)	NO ₂ (ppb)	O ₃ (ppb)	CO (ppm)	PM ₁₀ (µg/m ³)
Spring	Sector 1	2.6	3.8	55.4	0.6	70.4
	Sector 2	2.0	3.4	48.7	0.6	67.6
	Sector 3	1.7	4.7	45.3	0.5	53.6
	Sector 4	1.7	4.0	52.5	0.5	54.5
	Local	2.2	5.0	49.4	0.5	56.3
Summer	Sector 1	1.2	2.5	37.1	0.6	38.9
	Sector 2	1.2	3.5	38.8	0.5	36.8
	Sector 3	1.0	4.1	32.7	0.6	34.4
	Sector 4	1.2	3.2	26.3	0.5	33.7
	Local	1.1	4.2	31.5	0.5	33.4
Fall	Sector 1	2.0	2.6	46.8	0.6	59.0
	Sector 2	1.9	2.7	44.5	0.6	42.1
	Sector 3	1.7	3.7	40.5	0.6	35.8
	Sector 4	1.2	3.2	35.2	0.5	39.2
	Local	1.5	3.9	39.6	0.6	41.0
Winter	Sector 1	4.8	4.4	43.6	0.7	61.2
	Sector 2	3.7	3.5	36.1	0.6	45.3
	Sector 3	2.9	6.0	31.0	0.6	36.6
	Sector 4	2.7	5.3	37.3	0.6	43.5
	Local	4.5	6.2	35.9	0.5	50.8

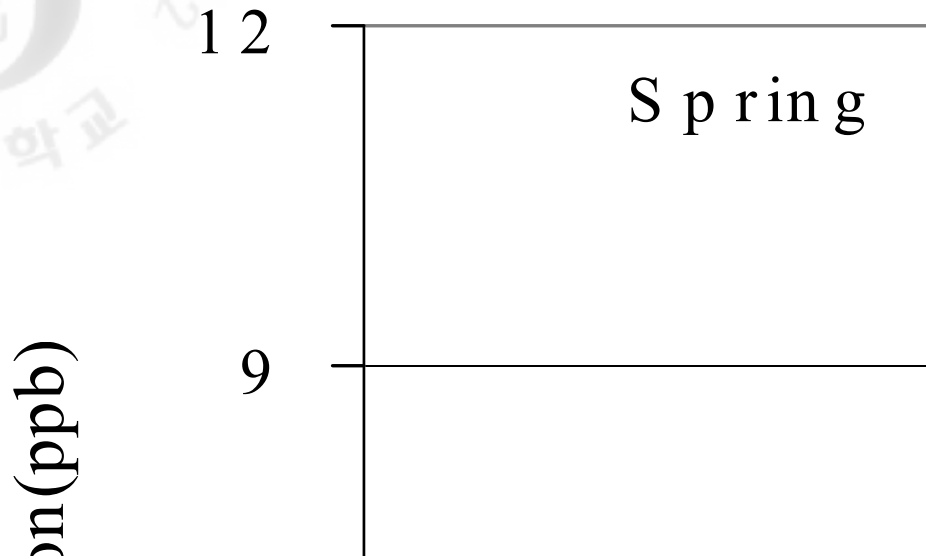


Figure 36. Seasonal and sectional comparison of SO₂ concentration.

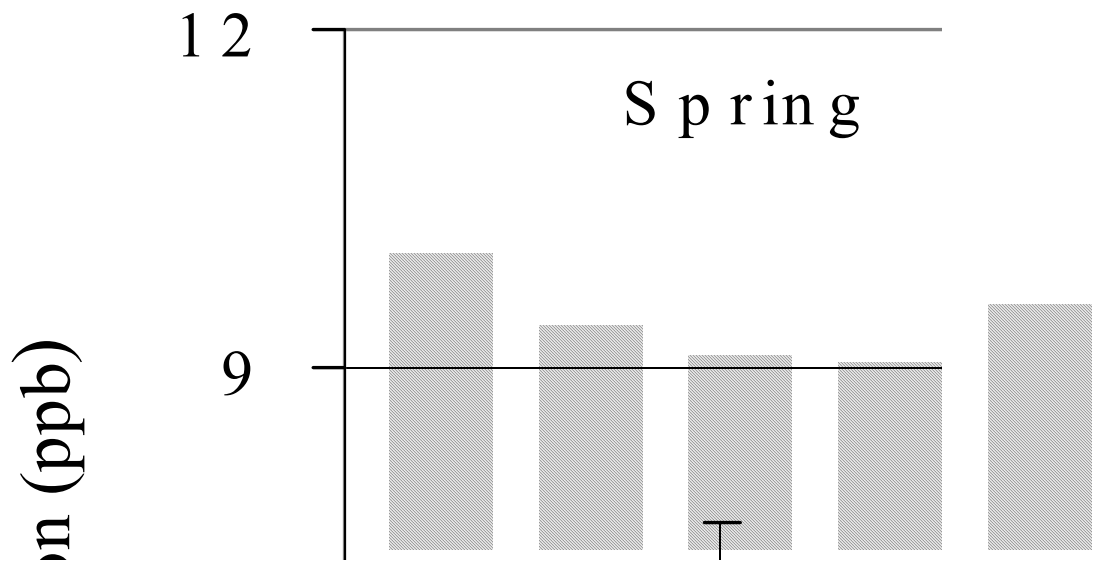


Figure 37. Seasonal and sectional comparison of NO₂ concentration.

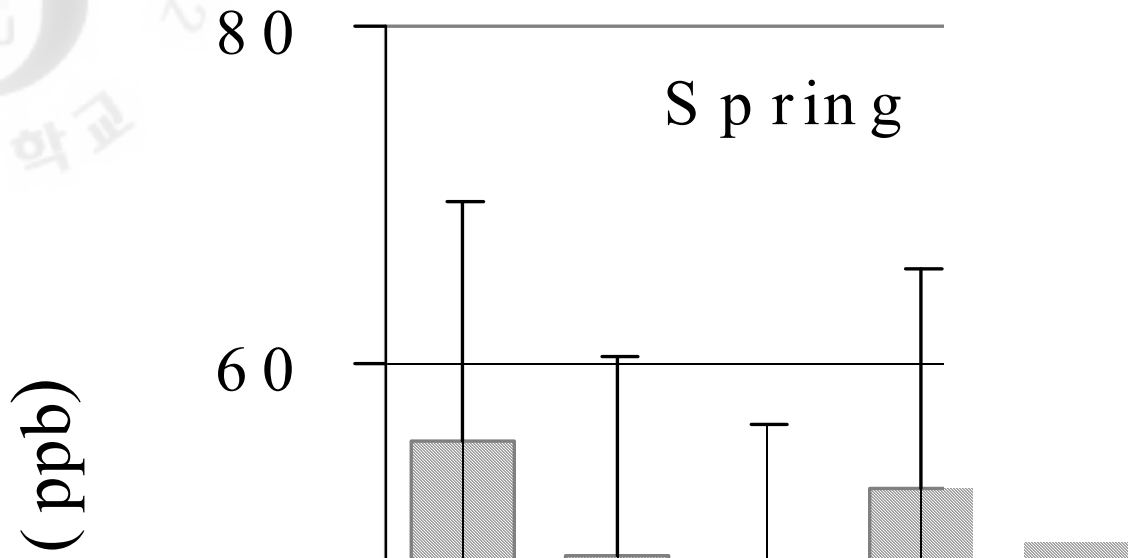


Figure 38. Seasonal and sectional comparison of O₃ concentration.

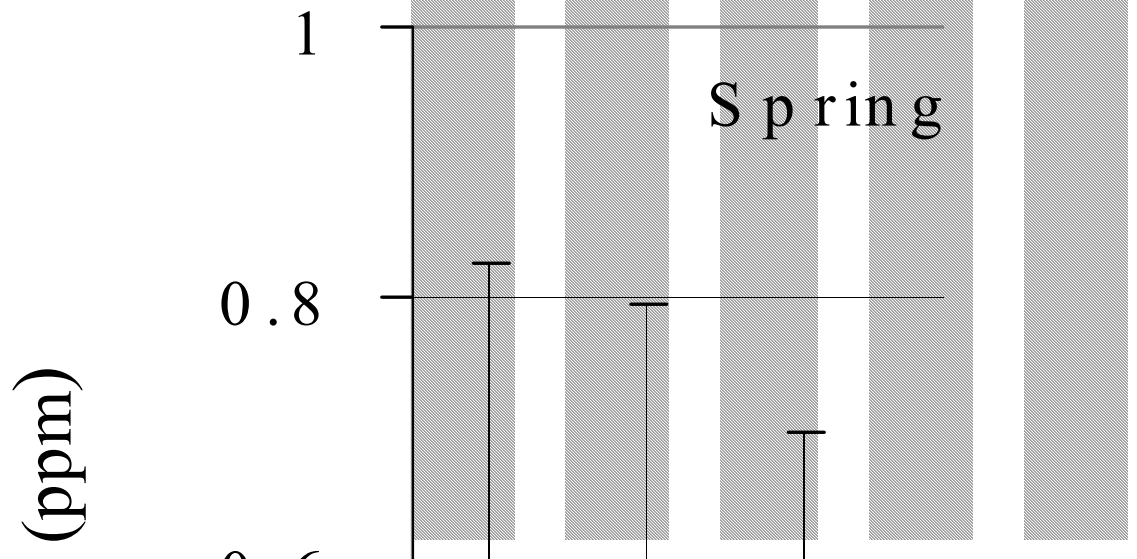


Figure 39. Seasonal and sectional comparison of CO concentration.

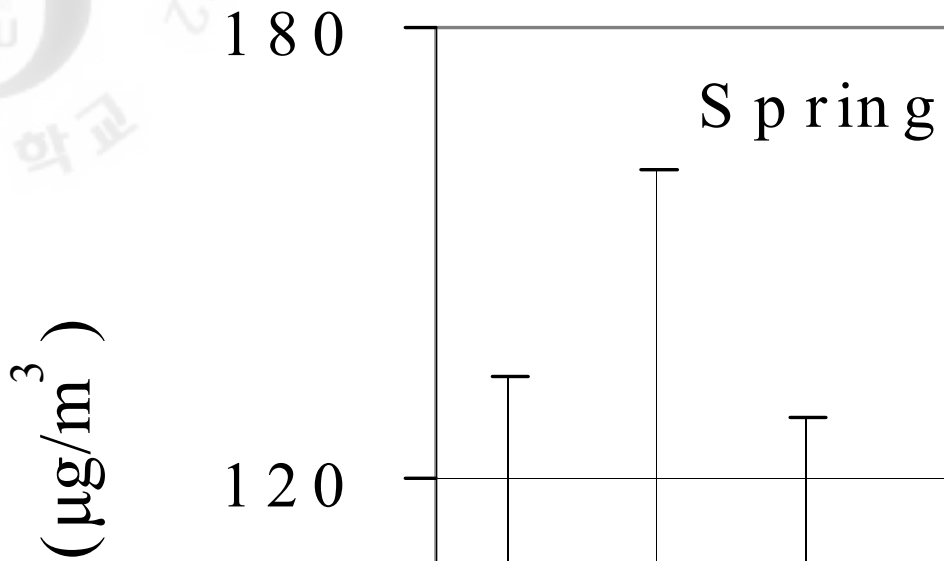


Figure 40. Seasonal and sectional comparison of PM₁₀ concentration.

2) 풍향별 라돈과 대기오염물질의 농도 비교

풍향에 따라 라돈 농도가 주요 대기오염물질들과 어떠한 상관성을 보이는지 알아보기 위하여 제주지역을 중심으로 주변 구역을 5개 구간으로 구분하여 구간별 농도를 조사하였다. 풍향별 구간은 중국대륙을 포함한 북서(225°~337°) 방향을 Sector 1, 한반도(337°~45°) 방향을 Sector 2, 동해와 일본(45°~135°) 방향을 Sector 3, 북태평양(135°~225°) 방향을 Sector 4, 제주도 국지 풍향을 Local로 구분하였다. 그리고 시간평균 라돈농도를 계절별로 크게 상위 25%, 중간 50%, 하위 25%를 구분하여 이와 동일한 시기의 대기오염물질 농도를 라돈 농도와 상호 비교하였다. 그리고 이러한 조사한 풍향별, 계절별 농도 변화를 Figure 41~45에 비교하였다.

먼저 Sector 1 풍향에서는 겨울철 O₃을 제외한 나머지 5가지 대기오염물질이 라돈 농도가 상위 25%일 때 높은 농도, 라돈 농도가 하위 25%일 때 낮은 농

도를 보여 라돈과 유사한 변화 패턴을 보였다. 그 중에서도 SO₂, NO₂의 경우 상위 25%, 중간 50%, 하위 25%에서 각 구간의 농도가 라돈의 농도 변화와 비슷한 패턴을 보여 서로 상관성이 크게 나타났다.

또한 Sector 2 풍향에서는 Sector 1보다는 각 구간의 농도 차이는 작지만 대체적으로 라돈과 유사한 농도변화를 보였다. SO₂, NO₂, CO, PM₁₀ 성분들은 겨울철에 각 구간에서 라돈과 유사한 농도변화 패턴을 보였다. 또 봄철에는 PM₁₀만 동일한 농도변화를 보였고, 이를 제외한 나머지 성분들은 다소 다른 패턴을 나타내었다. 그러나 O₃는 라돈의 변화와는 전혀 다른 패턴을 나타내어 라돈 농도와의 상관성이 아주 낮은 것으로 조사되었다.

Sector 3 풍향에서는 O₃를 제외한 나머지 모든 성분들이 라돈과 유사한 농도 변화 패턴을 보였지만, 여름철에 SO₂, NO₂, PM₁₀이 다소 다른 추세를 나타내었다. 반면에 CO는 사계절 모두 각 구간의 농도 차이가 대체적으로 0.05~0.1 ppm의 적은 차이를 보이고 라돈과도 농도변화 패턴이 잘 일치하는 결과를 나타내었다.

Sector 4 풍향에서는 NO₂, SO₂가 대체적으로 비슷한 추세를 보였지만, SO₂의 경우 각 구간의 농도 차이가 일정치 않아 라돈의 패턴과는 다소 차이를 보였다. CO 또한 각 구간의 농도차이가 거의 없거나, 일정하지 않아 라돈의 패턴과는 다른 경향을 보였으나, PM₁₀은 겨울철을 제외하고 유사한 추세를 나타내었다. 이처럼 Sector 4 구간의 풍향일 때 다른 풍향에 비해 라돈과의 상관성이 낮아지는 것은 해양에서 이동하는 해양풍의 영향으로 라돈 농도가 상대적으로 낮기 때문인 것으로 판단된다.

풍속이 낮고 기류가 정체된 'Local' 풍향에서는 NO₂만이 4계절 모두 라돈 농도변화 패턴과 잘 일치하였다. 그리고 SO₂와 PM₁₀은 봄, 여름, 가을철에는 라돈의 농도변화 패턴과 잘 일치하였으나 겨울철에는 이러한 변화가 다소 다르게 나타났다. CO 또한 가을철을 제외한 나머지 모든 계절에 라돈의 농도변화와 잘 일치하는 경향을 보였다. 그러나 O₃의 경우, 4계절이 모두 라돈의 농도변화 추세와는 아주 다른 패턴을 보이는 것으로 조사되었다.

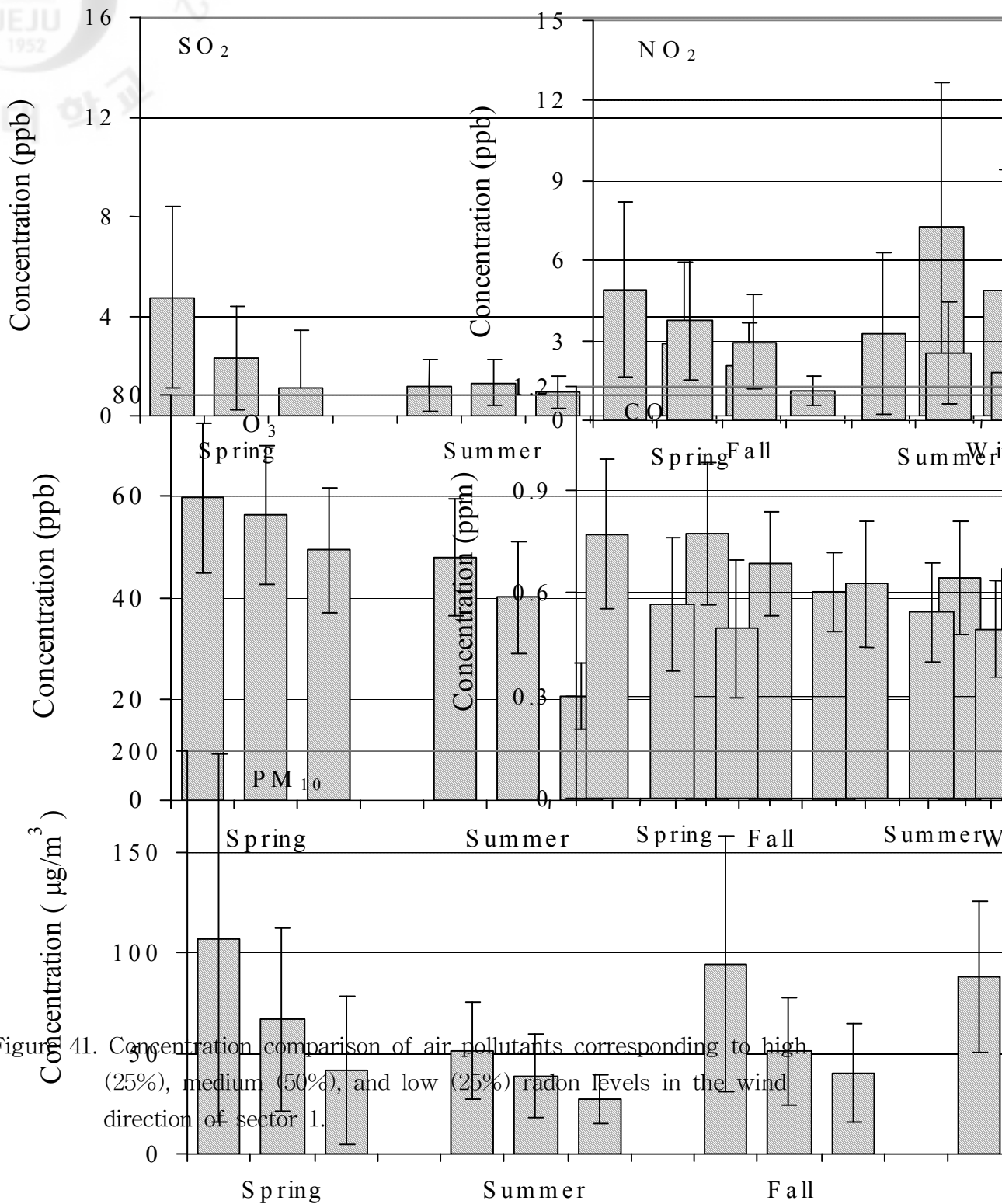
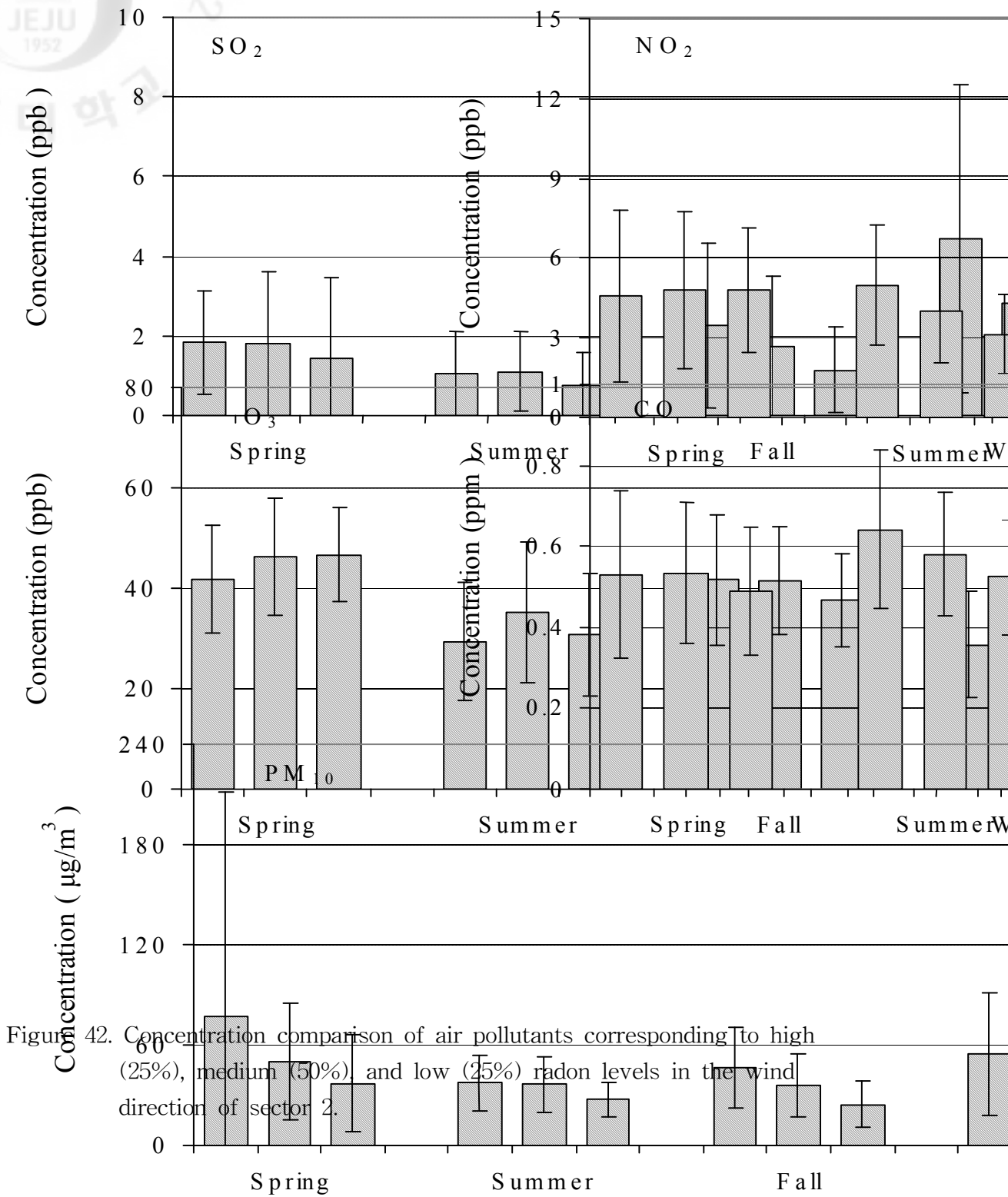


Figure 41. Concentration comparison of air pollutants corresponding to high (25%), medium (50%), and low (25%) radon levels in the wind direction of sector 1.



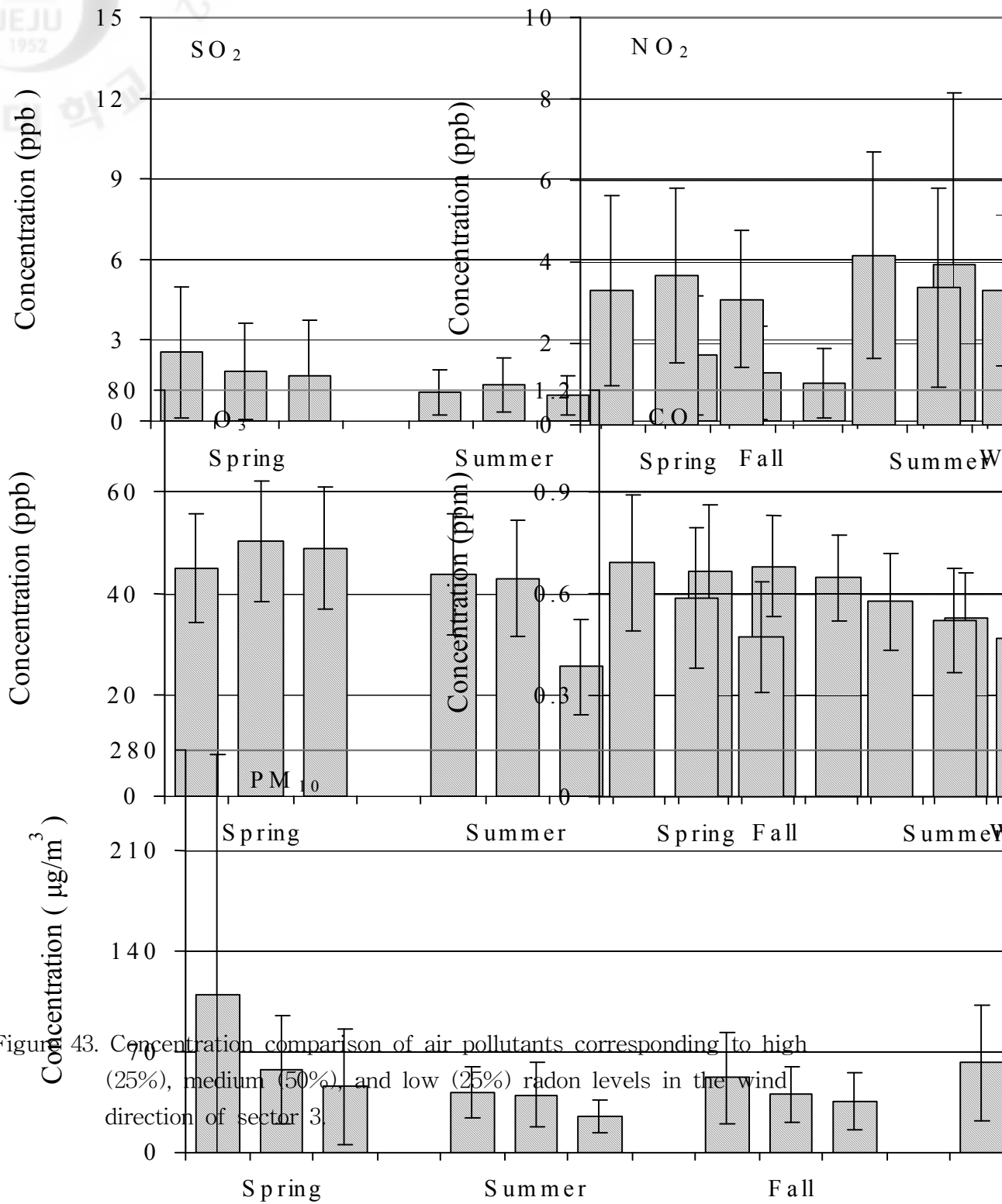
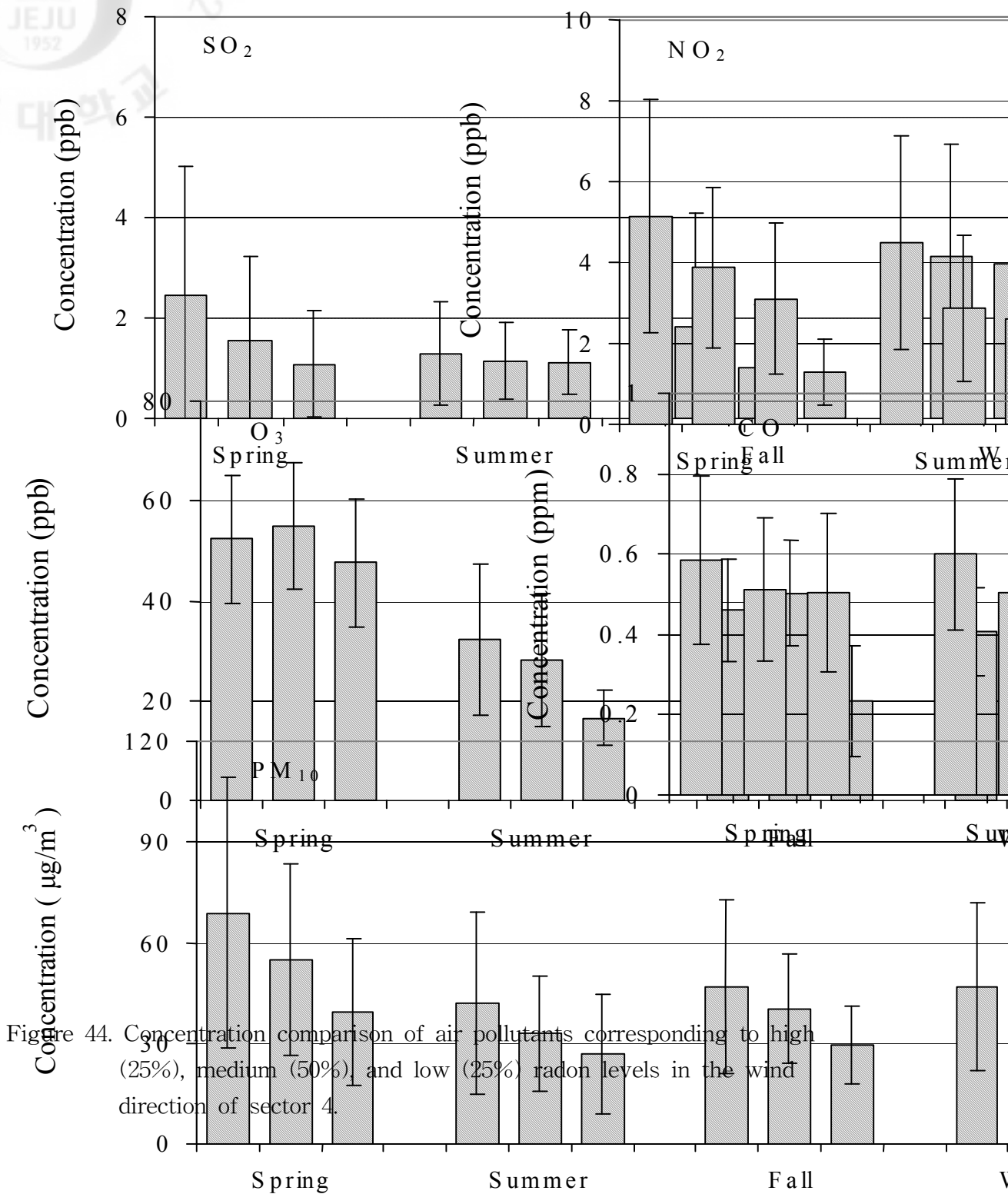
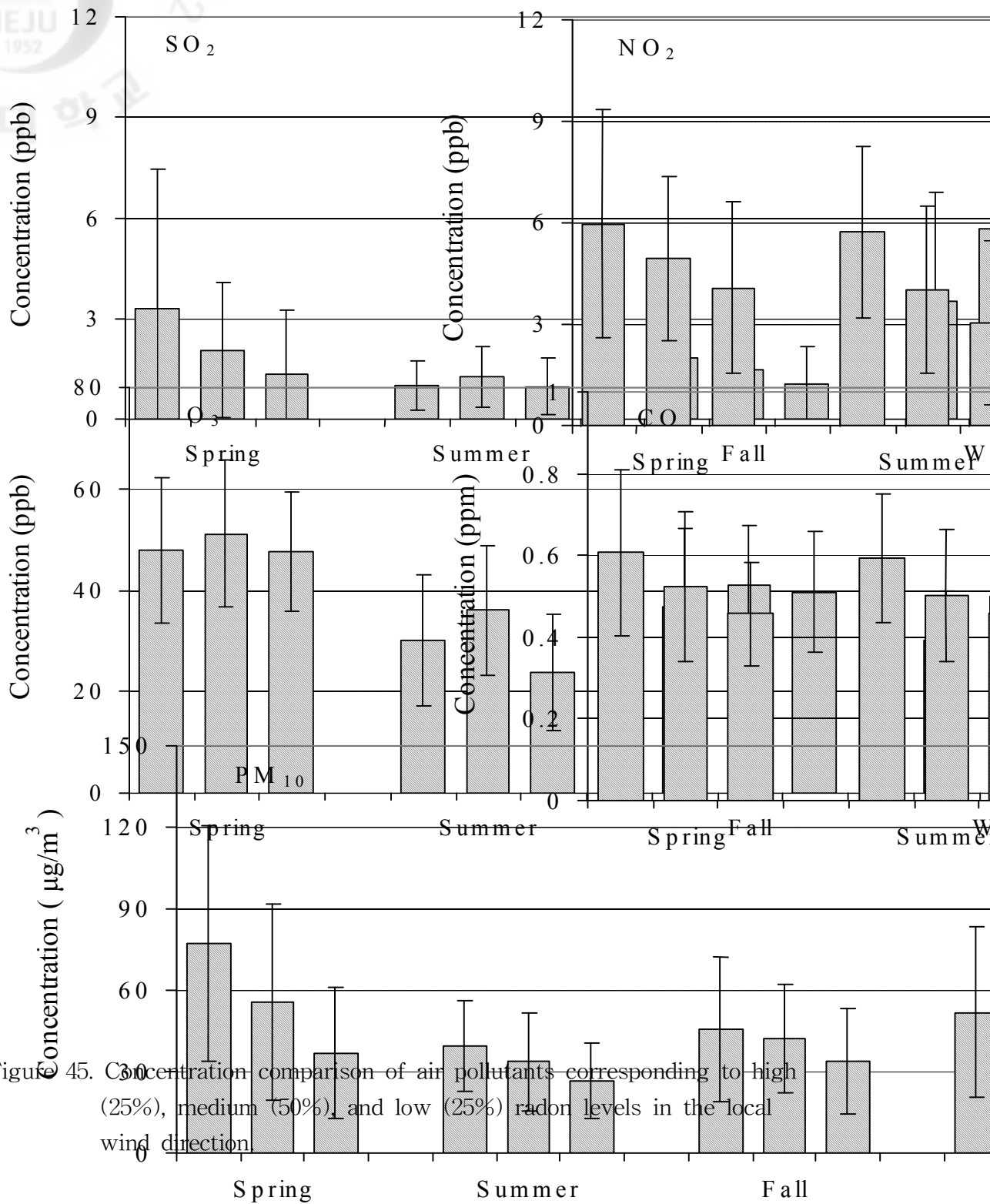


Figure 43. Concentration comparison of air pollutants corresponding to high (25%), medium (50%), and low (25%) radon levels in the wind direction of sector 3.





IV. 요약 및 결론

제주도 고산지역에서 2006년부터 2008년까지 대기 중의 라돈과 오염물질의 농도를 실시간 모니터링한 결과로부터 대기오염물질의 시계열 변화와 오염특성을 조사하였다.

연구기간동안 라돈의 평균농도는 2965 mBq/m^3 로 국내 서울지역에 비해 2.6배 더 낮았다. 그리고 해외 배경지역인 홍콩의 Hok Tsui 보다는 1.9배 낮으나 일본의 Sado Island와 하와이의 Mauna Loa 보다는 각각 1.2배, 20배 더 높은 농도를 나타내었다. 계절별로는 겨울(3578 mBq/m^3) > 가을(3351 mBq/m^3) > 봄(2832 mBq/m^3) > 여름(2073 mBq/m^3)의 순으로 높은 농도를 보였으며, 월별로는 1월이 3713 mBq/m^3 로 최고 농도를, 7월이 1946 mBq/m^3 으로 최저 농도를 나타내었다. 또한 일간 변화를 살펴 본 결과, 주간에 비해 야간에 더 높은 경향을 보였고 오전 7시경에 최고농도(3356 mBq/m^3), 혼합고가 최대가 되는 오후 2~3시경 최저 농도(2536 mBq/m^3)를 나타내었다. 역궤적 분석을 통해 라돈 농도가 높은 상위 10%와 하위 10%의 유입경로를 추적한 결과, 농도가 높을 때는 기단이 대부분 중국대륙으로부터 제주지역으로 유입되었고, 농도가 낮을 때에는 주로 해양(북태평양)으로부터 유입되는 것으로 확인되었다.

연구기간의 주요 대기오염물질의 평균농도는 SO_2 , NO_2 , O_3 , CO , PM_{10} 이 각각 2.1 ppb, 3.7 ppb, 39.8 ppb, 0.6 ppm, $45.9 \mu\text{g/m}^3$ 를 나타내었다. 이들의 농도를 국내 타 지역과 비교해 본 결과, 대체적으로 SO_2 , NO_2 , CO , PM_{10} 은 3~4배 정도 낮은 농도를 나타내었고, O_3 은 1.5~2배 차이를 보여 상대적으로 낮은 변화를 보이는 것으로 조사되었다.

라돈과 대기오염물질의 월별 농도변화를 비교해 본 결과, SO_2 , NO_2 , PM_{10} 은 라돈과 유사한 변화 패턴을 보였으나 O_3 와 CO 는 서로 다른 변동 특성을 나타내었다. 계절별로는 대체적으로 겨울이 높고 여름에 낮은 농도 변화를 나타내었고, 라돈과 SO_2 , NO_2 , CO 는 겨울철에 모두 높지만 PM_{10} , O_3 는 봄철이 더 높은 계절별 특성을 나타내었다. 시간별로는 SO_2 는 오전 11~12시에, NO_2 는 오전 9~10시,

오후 7~8시에 더 높은 경향을 보였고, CO는 라돈과 유사하게 오전에 높고 오후가 낮은 패턴을 보였다. 반면에 O₃는 오전 7~8시에 낮고 오후 4시경에 높은 농도를 나타내어 라돈과 서로 상반된 일별 변화를 나타내었다. 풍향별 비교에서는 대부분의 대기오염물질이 대체적으로 중국대륙에서 기류가 이동했을 때 높은 농도를 보였고, NO₂의 경우에는 대기가 정체되었을 때 다소 더 높은 농도를 나타내었다.

라돈과 대기오염물질의 상관성을 확인하기 위하여 라돈 농도가 상위 25%, 중간 50%, 하위 25%일 때 대기오염물질의 농도변화를 비교하였다. 그 결과 SO₂, NO₂, PM₁₀은 계절별, 풍향별 비교에서 라돈과 비슷한 경향을 보이고, CO는 계절별 비슷한 경향을 보였으나, O₃는 다른 추세를 나타내었다.

V. 참 고 문 헌

1. 강창희, 고희정, W. Zahorowski, (2007) 제주도 고산지역의 라돈 및 TSP 에어로졸 농도 특성: 2001~2004년 측정, 한국대기환경학회지, 23(5), 612-624.
2. 고희정 "제주도 고산지역 대기 총부유분진의 화학 조성에 미치는 영향인자 연구" 박사학위 청구논문 (2010).
3. 국립환경과학원, "장거리이동 입자상물질의 화학적 특성과 거동에 관한 연구(Ⅲ)" (2007).
4. 국립환경연구원 우리나라에 침적되는 황산화물의 20%는 중국으로부터 도래, 국립환경연구원 보도자료 (2004.11.18.).
5. 김경원, 방소영, 정종현 (2008), 기단 역궤적분석에 의한 경주시 대기오염물질의 농도 변화, 한국대기환경학회지, 24(2), 162-175.
6. 김나경, 김용표, 강창희, 문길주 (2003), 고산에서 측정한 PM2.5 이온 농도 특성: 1998~2002년 측정자료, 한국대기환경학회지, 19(3), 333-343.
7. 김상균, 이재범, 최원준, 이용희, 박일수, 차준석, 최진수, 김정수 (2007) 대기 고도별 농도 기여율과 침적량 기여율의 상관 관계 및 장거리 이동 특성 파악, 2007년 환경공동학술대회 초록집, 1564-1566.
8. 김신도 등, "대도시 대기질 관리방안 조사연구: 미세먼지 생성과정 규명과 저감대책 수립", 국립환경과학원 보고서(RAL-0703114) (2007).
9. 김영성, 이승복, 김진영, 배귀남, 문길주, 원재광, 윤순창 (2003) 1999년 4월부터 2000년 6월까지 황해 덕적도에서 관찰된 대기오염물질 변화 특성, 한국대기환경학회지, 19(4), 347-361.
10. 김윤신, 이철민, 김현탁, Takao Iida (2002) Alpha Track Detector를 이용한 실내외 라돈 농도조사에 관한 연구, 한국환경위생학회지, 28(5), 71-76.
11. 김윤신, 이철민, 전형진, 장은숙, 홍승철 (2003) 연속 모니터를 이용한 대기중 라돈농도의 특성에 관한 연구, 한국대기환경학회 2003 추계학술대회논문집, 360-361.

12. 김윤신, 이철민, 김기연, 전형진, 김종철, Takao Iida (2007) 동북아 오염물질 장거리이동 분석을 위한 서울시 대기 중 라돈농도의 시계열적 특성에 관한 연구, 한국환경보건학회지, 33(4), 283-292.
13. 김의훈, 김필수, 김채욱, 이건상, 권기덕 (1985) 공기중의 Radon 방사능 측정에 의한 서울 대기의 혼합높이 결정, 환경과학논문집, 6(2), 129-136.
14. 김행범 "국내 배경지역의 가스상 오염물질 장거리 이동 연구" 석사학위 청구논문 (2011)
15. 류상범, 김명수, 김상백, 김정식, 공종웅, 유희정 등 (2008) 2007 지구대기감시, 기상청 보고서.
16. 문광주, 한진석, 공부주, 정일록, Steven S. Cliff, Thomas A. Cahill, Kevin D. Perry (2006) PMF 분석을 이용한 ACE-Asia 측정기간 중 제주 고산지역 입자상 물질의 입경별 발생원 추정, 한국대기환경학회지, 22(5), 590-603.
17. 문기훈, 김진섭, 안정근, 김현철, 이호민 (2009) 화강암 잔류 토양의 토양 가스 중 라돈의 장기적 변화 특성, 암석학회지, 18(4), 279-291.
18. 송미정, 이미혜, 문광주, 한진석, 김경렬, 이강웅 (2006) ABC-EAREX2005 미세 에어로솔의 화학적 특성, 한국대기환경학회지, 22(5), 604-613.
19. 이용희, 김상균, 이재범, 최원준, 차준석, 최진수, 박일수 (2007) 서해상 대기오염물질 고농도 현상에 대한 원인 분석, 환경공동학술대회 초록집, 1561-1563.
20. 주옥정, 박수미, 이승복, 진현철, 변두섭, 배귀남 (2006) 대도시 도로변에서 가스상 대기오염물질의 농도 특성, 한국대기환경학회 2006 춘계학술대회논문집, 288-289.
21. 제현국 (2010) 국내외 라돈정책 및 라돈산업의 현황, 한국지구시스템공학회지 47(3), 400-405.
22. 차준석, 김상균, 박일수, 이동원, 이재범, 최원준, 이용희, 최진수, 이재선, 최절우 (2006) 동북아대기오염 감시체계 구축 및 환경보건협력사업Ⅶ, 국립환경과학원 보고서.
23. 최임조, 신승호, 조완근 (2009) 다중 이용 건물 또는 지하 실내 공간의 용도에 따른 라돈 오염도 비교와 지하 공간의 시간대별 라돈 농도 변화, 환경독성보건학회지, 24(3), 203-211.

24. 한진석, 김영미, 안준영, 공부주, 최진수, 이상욱, 이석조 (2005) 장거리이동 대기오염물질 이동량의 공간적 분포와 변화 추이 (1997~2004), 한국대기환경학회지, 22(1), 99-106
25. 한진석, 홍유덕, 이영재, 김록호, 이종현 (2006) 고농도 오존발생시 오존전구 물질 및 기상인자 연구, 국립환경과학원 보고서.
26. 환경백서 (2008).
27. 환경부 다중이용시설 등의 실내공기질관리법, 1-26 (2003).
28. 환경부 우리나라에 쌓이는 대기오염물질 20%가 중국에서 날아와, 뉴스레터, 제 23호, (2004.11.19)
29. 환경부 대기환경연보 (2007, 2010).
30. Akimoto, H., H. Mukai, M. Nishikawa, K. Murano, S. Hatakeyama, C.M. Liu, M. Buhr, K.J. Hsu, D.A. Jaffe, L. Zhang, R. Honrath, J.T. Merrill, R.E. Newell (1996) Long rang transport of ozone in the East Asian Pacific rim region, Journal of Geophysical Research 101(D1), 1999-2010.
31. Akimoto, H., T. Ohara, J.I Kurokawa, N. Horii (2006) Verification of energy consumption in China during 1996-2003 by using satellite observational data, Atmospheric Environment 40(40), 7663 - 7667.
32. Atmospheric Brown Clouds (ABC) Gosan Campaign: East Asian Regional Experiment 2007 (2007) <http://abc-gosan.snu.ac.kr>.
33. Bates, T.S., D.J. Coffman, D.S. Covert, and P.Q. Patricia (2002) Regional marine boundary layer aerosol size distributions in the Indian, Atlantic, and Pacific Oceans: A comparison of InDoEX measurements with ACE-1, ACE-2 and Aerosols 99, Journal of Geophysical Research, 107(D19), 8,026.
34. Bonotto, D.M., P.C. Padron-Armada (2008) Radon and progeny(214Pb and 214Bi) in urban water-supply systems of Sao Paulo State, Brazil, Appl. Geochem, 23, 2,829-2,844.
35. Chan, S.W., C.W. Lee, K.C. Tsui (2010) Atmospheric radon in Hong Kong, Journal of Environmental Radioactivity, 101(6), 494-503.
36. Chambers, S. W. Zahorowski, K. Matsumoto, 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.
37. 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) 29,255–29,268.
 38. Duckworth, F.A., J.S. Sandberg (1954) The effect on cities upon horizontal and vertical temperature gradients, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 35, 198–207.
 39. Font L, C. Baixeras, V. Moreno (2008) Indoor radon levels in underground workplaces of Catalonia, Spain, *Radiation Measurements*, 43, S467–S470.
 40. Font L., C. Baixeras (2003) The RAGENA dynamic model of radon generation, entry and accumulation indoors, *Science of The Total Environment*, 307, 55–69.
 41. Guttikunda S. K., N. Thongboonchoo, R.L. Arndt, G. Calori, G.R. Carmichael D.G. Streets (2001) Sulfur deposition in Asia: seasonal behavior and contributions from various energy sectors, *Water, Air and Soil pollution*, 131, 383–406.
 42. Hatakeyama S., K. Murano, F. Sakamaki, H. Mukai, H. Bandow, and Y. Komazaki (2001) Transport of atmospheric pollutants from East Asia, *Water, Air and Soil Pollution*, 130, 373–378.
 43. Huebert, B.J., T. Bates, P.B. Russell, G. Shi, Y.J. Kim, K. Kawamura, G. Carmichael, T. Nakajima (2003) An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts, *Journal of Geophysical Research*, 108(D23), 8,633.
 44. Jamil, K., K.K. Al-Ahmady, Fazal-ju-Rehman, S. Ali, A.A. Qureshi, H.A. Kahn (1997) Relative performance of different types of passive dosimeters employing solid state nuclear track detectors, *Health Physics*, 73(4), 629–632.
 45. Kim, J., S.C. Yoon, A. Jefferson, W. Zahorowski, and C.H. Kang (2005) Air mass characterization and source region analysis for the Gosan

- super-site, Korea, during the ACE-Asia 2001 field campaign, *Atmospheric Environment*, 39(35), 6,513-6,523.
- 46 Miles, J. (1988) Development of maps of radon-prone areas using radon measurements in houses, *Journal of Hazardous Materials*, 61, 53-58.
47. Pochanart, P., S. Kato, T. Katsuno, H. Akimoto (2004) Eurasian continental background and regionally polluted levels of ozone and CO observed in northeast Asia, *Atmospheric Environment*, 38(9) 1325 - 1336.
48. Radon Information Center, *What is Radon/Radon Investigation* (www.radon.or.kr).
49. Sesana, L., E. Caprioli, 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.
50. Streets, D.G., N.Y. Tsai, H. Akimoto, K. Oka (2000) Sulfur dioxide emissions in Asia in the Period 1985-1997, *Atmospheric Environment* 34(26), 4,413-4,424.
51. Tu, F.H., D.C. Thornton, A.R. Bandy, M.S Kim, G.R. Carmichael, Y. Tang, L. Thornhill, and G. Sachse (2003) Dynamics and transport of sulfur dioxide over the Yellow Sea during TRACE-P, *Journal of Geophysical Research*, 108(D20), 8,790.
52. US EPA (2003) Assessment of radon risk in home US EPA 402-R-03-003.
53. US EPA (2006) Consumer's Guide To Radon Reduction, US EPA 402-K-06-094.
54. US EPA (2007) A Citizen's Guide to Radon, US EPA 402-K-07-009.
55. US EPA (2009) A Citizen's Guide to Radon, US EPA 402-K-09-001.
56. Vogianis E., 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.
57. Vinson D. T.R. Campbell, A. Vengosh (2008) Radon transfer from groundwater used in showers to indoor air, *Applied Geochemistry*, 23(9),

2,676-2,685.

58. Whittlestone, S., W. Zahorowski (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.
59. Zahorowski, W., S. Chambers, T. Wang, C.H. Kang, I. Uno, S. Poon, S.N. Oh, S. Werczynski, J. Kim, 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.
60. Zahorowski, W., S.D. Chambers, A. Henderson-Sellers (2004) Ground based radon-222 observations and their application to atmospheric studies, *Journal of Environmental Radioactivity*, 76(1-2), 3-33.
61. Zhang, M., I. Uno, Y. Yoshida, Y. Xu, Z. Wang, H. Akimoto, T. Bates, T. Quinn, A. Bandy, B. Blomquist, (2004), Transport and transformation of sulfur compounds over East Asia during the TRACE-P and ACE-Asia campaigns, *Atmospheric Environment* 38(40), 6947 - 6959.
62. Zhang, Q., D.G. Streets, G.R. Carmichael, K. He, H. Huo, A. Kannari, Z. Klimont, I. Park, S. Reddy, J.S. Fu, D. Chen, L. Duan, Y. Lei, L. Wang, Z. Yao (2009) Asian emission in 2006 for the NASA INTEX-B mission, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(1), 5131-51.