

연구논문

수막재배시설 실내공기 중 라돈 농도 특성에 관한 연구

김상철[†] · 박찬주 · 최재혁 · 서민아 · 엄진균 · 박미선

세종특별자치시 보건환경연구원

A Study on the Characteristics of Indoor Radon Concentration in Water Curtain Cultivation Facilities

Sang-cheol Kim[†], Chan-ju Park, Jae-hyuk Choi, Min-a Seo, Jin-gyun Eom, and Mi-sun Park

Sejong Institute of Health and Environment, Jochiwon-eup, Sejong Special Self-Governing City, 30015, Korea

Received May 23, 2021 / Revised June 18, 2021 / Accepted June 21, 2021

The aim of this study was to investigate indoor radon concentration in the water curtain cultivation facilities located in the rural area of Sejong city during the winter season. The bedrock of the southern part of the city is mainly composed of granite rocks, which have been reported to retain higher radon content than sedimentary and metamorphic rocks. The measured indoor radon concentrations were very high in all the facilities partially exceeding the recommended values provided in the 「Indoor Air Quality Control Act」 guidelines. Furthermore, we observed that operation of equipment to maintain stable indoor temperatures resulted in diurnal variations in radon concentration. Based on the results, we concluded that suitable measures such as changing the time at which work starts or ventilating in advance could help reduce the duration of exposure to radon.

Keywords: Indoor Air pollution, Radon Measurement, Water Curtain Cultivation Facilities

1. 서 론

폐암의 원인 물질로 널리 알려진 라돈은 자연적으로 발생하는 방사성 기체 물질이며 주로 우라늄(U), 라듐(Ra) 등 모핵종의 방사성 붕괴 과정에서 주로 생성된다. 라돈은 무색, 무취의 특성을 가지기 때문에, 라돈에 노출 되어도 인식하는 것이 쉽지 않다.¹⁾ 일상생활에서의 방사능 노출의 대부분은 라돈 노출에 기인하기 때문에 라돈은 흡연에 이어 두번째로 폐암 유발의 중요한 원인으로 알려져 있다.²⁾

라돈은 모핵종에 따라 ²²²Rn, ²²⁰Rn, ²¹⁹Rn와 같은 동위원소의 형태로 존재하며, 이 중 ²³⁸U의 붕괴계열에서 생성되는 ²²²Rn이 가장 안정적인 형태로 약 3.8일의 반감기를 갖는다. 라돈의 모핵종은 암석이나 토양 등에 분포하고 있는 미량 원소로 지질학적 특성에 따라 그 함량이 매우 다르다. 실내공기 중 라돈의 대부분은 지

반의 암석과 토양에서 확산, 대류 등을 통해 유입되며, 일부는 실내 건축자재, 지하수 이용과정 등에 기인한다. 화강암 지역의 지하수 및 건축물 실내공기 중 라돈 농도는 퇴적암, 변성암 등 다른 지질로 구성된 지역보다 높게 나타나 지질과 라돈이 밀접하게 연관되어 있음을 보여준다.^{3,4)}

라돈에 의한 건강영향은 주로 폐암, 악성종괴종 등으로 세계보건기구 산하 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer)에서는 라돈을 사람에게 암을 유발하는 물질을 의미하는 Group I으로 분류하였다.⁵⁾ 라돈의 높은 건강위해성 및 실내공기를 통한 노출로 인해 정부는 「실내공기질 관리법」에 권고기준(148 Bq/m³)을 설정하여 관리를 유도하고 있으나 적용대상 시설은 많은 사람들이 이용하는 병원, 도서관, 대규모 점포 등으로 대부분 도심지역에 위치하고 있다. 따라서 토양이 공기에 직접적으로 노출되는 농촌 또는 삼림지역에 위

[†]To whom correspondence should be addressed.

치한 시설은 지질에 따라 실내공기 중 고농도 라돈이 형성될 개연성이 높지만 법률 적용에서 제외되어 라돈 농도에 대한 자료가 부족해 이에 대한 조사 및 연구가 필요하다.

세종특별자치시 남부지역 지질은 우리나라에 넓게 분포하고 있는 유라기 대보화강암(Jurassic Daebo granite)으로 같은 지질대에 위치한 이천, 논산 등에서 지하수 라돈이 높은 수준으로 확인되었다.^{3,6,7)} 본 연구는 해당 지역에 위치한 재배시설 실내공기 중 라돈 농도를 조사하여 라돈 실태를 파악하고, 노출 저감을 위한 기초 자료를 구축하고자 수행되었다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상 및 연구기간

본 연구는 세종특별자치시 남부지역에 위치한 3개의 수막재배시설(A, B, C)을 대상으로 수행되었다. 수막재배시설은 우리나라 농촌에서 겨울철 난방비 절감을 목적으로 널리 활용되고 있는 시설로 작물 생육의 중요한 인자인 내부온도의 항상성 유지를 위해 연평균 15°C 내외로 일정하게 유지되는 지하수의 수온을 이용한다.⁸⁾ 즉, 내부온도가 일정 수준 이하로 내려가게 되면 시설이 가동되어 가장자리 비닐이 지면으로 내려와 외기 유입이 차단되고, 시설 상부의 비닐 표면에 지하수가 분사됨으로써 내부온도가 일정 수준으로 유지된다. 반대로 내부온도가 상승하게 되면 시설의 작동이 멈추고 자연환기가 이루어져 온도의 상승이 억제된다.⁹⁾

A시설과 B시설은 같은 장소에 나란히 위치하고 있었으며, C시설은 두 시설로부터 약 5 km 정도 떨어진 곳에 위치하였다. 작물재배 방식의 경우 A시설은 약 1 m 정도 높이의 베드(bed)에 작물을 재배하는 고설재배를 적용해 시설 바닥의 토양이 비닐로 덮여 있었다. 반면 B시설과 C시설은 토경재배로 토양에 직접 작물을 재배해 작물 주변의 토양이 공기에 직접 노출되어 있었다. 라돈 측정은 시설이 가동되는 동절기인 2019년 12월부터 2020년 2월까지 3개월간 24시간 연속적으로 이루어졌으며, 측정장비 이동 및 점검으로 인해 일부 기간은 제외되었다.

2.2. 시험방법

2.2.1. 측정장비

실내공기 중 라돈 측정은 두 종류의 장비를 이용해 수행되었다. 주 장비는 환경부 형식승인을 받은 (주)에프

티랩 社의 FRD-400(FRD, 인증번호 IAMS-2016-2)으로 2대를 활용하였으며, 보조 장비로 동일 제조사의 간이측정장비인 RadonEye(EYE) 3대를 활용하였다. 두 장비 모두 펄스형 이온화 챔버(pulsed ionization chamber) 방식으로 공기 시료가 장비 내부로 흡인되면 라돈의 방사성 붕괴에서 생성된 알파 입자가 공기를 이온화시켜 생성된 전류를 계측하여 라돈 농도를 측정한다. 주 장비인 FRD 수의 제한으로 FRD는 월별로 설치 대상시설을 변경해 모든 시설에서 1개월 이상 형식승인 장비에 의한 측정값을 획득하였으며, 두 장비의 측정결과 비교를 통해 EYE로 측정된 자료를 검증하였다. FRD, EYE 모두 측정결과는 1시간 동안의 라돈 평균농도로서 매 시간마다 생성되었다.

또한 C시설이 A시설, B시설에서 떨어진 곳에 위치함에 따라 토양에서 유입되는 라돈과 함께 지하수 분무과정에서 기화되는 라돈을 실내 라돈의 영향인자로 판단하여 지하수 중 라돈을 분석하였다. 지하수 시료는 「먹는물 수질감시항목 운영 등에 관한 고시」에 명시된 라돈 시험방법에 따라 실험실에서 설팬광용액 12 mL를 20 mL 폴리에틸렌 바이알에 주입한 후 현장으로 가져가 기포가 생기지 않도록 채수한 시료 8 mL를 담고 충분히 교반함으로써 채취 과정에서의 손실을 최소화하였다. 지하수 분석은 HIDEK 社의 액체섬광계수기(Liquid Scintillation Counter)인 300SL을 이용하였으며, 현장이중시료 분석을 통해 상대편차백분율이 정도관리 목표인 $\pm 25\%$ 이내임을 확인하였다.

2.2.2. 측정위치

라돈 측정장비는 실내공기질 공정시험기준에 따라 실내공기의 오염을 대표할 수 있는 곳에 설치하였다. 수막재배시설은 「실내공기질 관리법」의 적용대상은 아니지만 근로자가 시설에 체류하며 작업하기 때문에 호흡을 통해 실내공기 오염물질에 노출될 개연성이 높다. 이를 고려하여 사람이 노출되는 라돈의 농도를 파악하고자 ‘ES 02130.d 실내공기 오염물질 시료채취 및 평가방법’을 준용하여 측정장비를 시설의 가장자리에서 되도록 멀리 떨어진 지점의 바닥에서부터 1.2~1.5 m 높이의 위치에 설치하였다.

2.3. 통계 분석

측정장비 또는 측정방법에 따른 측정값의 관계(relationship) 분석은 환경, 보건 등 다양한 분야의 주요 연구목적 중 하나이며 표준 또는 기준이 되는 방법

(gold standard)에 대한 새로운 방법의 정확도를 평가하는데 활용된다. 이러한 관계는 변수의 형태에 따라 퍼센트 일치도(percent agreement), Cohen의 Kappa 등 다양한 지표(index)로 표현할 수 있다.¹⁰⁾ 이 중 가장 직관적이며 보편적으로 활용되는 방법은 상관분석으로 변수 X 값의 변동에 따라 다른 변수 Y가 어떻게 변하는지를 보여준다.¹¹⁾ 그러나 상관분석은 측정값 사이의 선형성에 의존하기 때문에 장비간 측정결과 평가에 있어 상관계수만을 적용하는 것은 주의가 필요하다.¹²⁾ 이를 고려하여 본 연구에서는 상관분석과 함께 연속형 변수간 관계분석에 활용되는 concordance correlation coefficient (CCC)를 적용해 EYE에 의한 측정결과를 검증하였다.¹³⁾ 모든 분석은 통계프로그램인 R(version 4.0.1)을 이용하여 수행하였다.¹⁴⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. 기술통계량

연구기간 동안 실내공기 라돈 자료는 A시설 3801개, B시설 1565개, C시설 2450개를 얻었으며, 각 시설의 기술통계량은 Table 1과 같았다. 전 기간 동안의 라돈 평균농도는 A시설 186.8 Bq/m³, B시설 944.8 Bq/m³, C시설 556.5 Bq/m³로 시설별로 큰 차이를 보였으며, 모두 권고기준인 148 Bq/m³를 초과하는 것으로 나타났다.¹⁵⁾ 이는 연구 수행기간 중 상당한 기간 동안 시설 내부에 고농도의 라돈이 형성되었음을 의미한다. 또한 표준편차 및 농도 범위(range)가 크게 나타난 것은 농도가 일정하지 않고 크게 변동했음을 보여준다.

월별 평균농도는 모든 시설에서 대체적으로 매월 감

소하는 경향을 나타냈다. 연구기간 동안의 평균기온은 12월 2.0°C, 1월 2.1°C, 2월 2.9°C로 점차 증가하였는데, 외부기온 상승에 따라 보온을 위한 가동시간이 감소해 이 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다. 또한 월별 기술통계량과 연구기간 전체의 기술통계량이 큰 차이를 보이지 않은 것은 라돈 농도의 높은 변동이 월별 차이 보다 일정한 경향에 따른 변동에 기인했음을 유추할 수 있다.

3.2. 하루 중 농도 변동

기술통계량 분석결과 라돈 농도가 일정한 경향을 나타냈을 것으로 판단하여 이를 확인하고자 하루 중 농도 변동을 분석하였다. Fig. 1은 각 시간대에 측정된 라돈 농도의 평균값을 권고기준(점선)과 함께 월별로 나타낸 것으로 하루 중 변화는 모든 시설에서 유사한 특성을 나타냈다. 오전에 최고농도에 도달한 후 오후에 최저농도를 보일 때까지 감소하고 저녁 및 밤에 다시 지속적으로 증가하였는데, 이 같은 특성은 수막재배시설의 가동에 따른 자연환기 여부에 기인한 결과로 판단된다. 즉, 일조로 인해 내부온도가 증가하는 오전에 가동이 중단되고 자연환기가 시작됨에 따라 농도는 감소하며, 외기유입 및 일조 감소로 온도가 일정 수준 이하로 떨어지면 가동이 재개되어 다시 농도가 증가하기 때문이다.

각 시설에서의 시간별 평균농도는 연구기간 평균농도와 유사하게 A시설에서 가장 낮고 B시설에서 가장 높았다. A시설의 경우 12월 141.0~408.1 Bq/m³, 1월 90.4~292.4 Bq/m³, 2월 34.6~244.2 Bq/m³, B시설에서는 12월 100.0~2733.0 Bq/m³, 1월 58.7~2484.4 Bq/m³, 2월

Table 1. Descriptive statistics for the observed radon concentrations at different facilities

Facility	Indoor Air (Bq/m ³)				Groundwater (Bq/L)
	Mean (SD)	Median	Min	Max	
A	186.8 (137.1)	173.0	1.0	613.0	
Dec	253.9 (150.2)	285.5	3.0	613.0	
Jan	185.8 (124.7)	183.0	2.0	509.5	84.5
Feb	120.1 (97.6)	101.0	1.0	394.0	
B	944.8 (936.5)	543.0	8.0	2994.0	
Dec	1019.1 (941.2)	693.5	17.0	2982.0	
Jan	1030.0 (960.7)	700.5	17.0	2994.0	84.5
Feb	808.3 (893.3)	396.3	8.0	2985.5	
C	556.5 (472.5)	444.0	12.0	2420.0	
Dec	685.5 (482.6)	578.8	13.5	2014.0	
Jan	510.5 (410.4)	424.0	12.0	2170.0	72.0
Feb	514.8 (510.0)	336.0	15.0	2420.0	

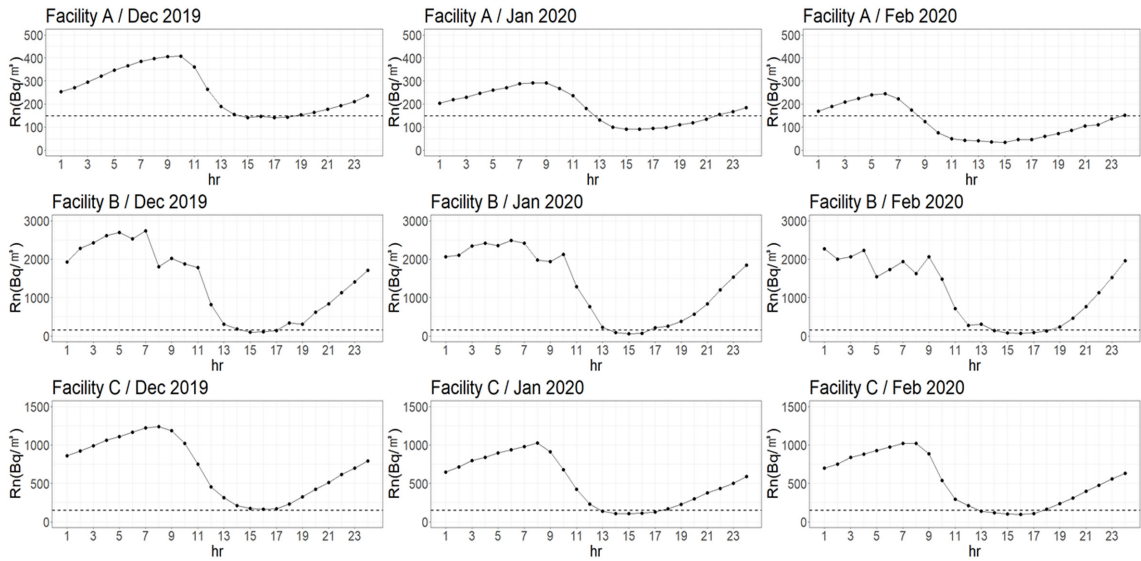


Fig. 1. Diurnal variation in the mean hourly concentration of indoor radon in three WCCF during December 2019-February 2020.

70.6~2267.4 Bq/m³ 범위를 나타내 B시설의 최고농도는 A시설 대비 약 6~9배로 매우 높았다. 두 시설은 같은 곳에 위치해 지질 차이가 극히 적고, 동일한 지하수를 사용했음에도 상반된 결과가 나타난 것은 재배방식의 차이에 기인한 토양의 공기 노출 여부가 원인으로 판단되며, 실내 라돈의 주요 유입경로가 토양에서의 이동임을 뒷받침한다.^{16,17)} A, B시설과 떨어진 곳에 위치한 C시설에서도 12월 162.3~1237.7 Bq/m³, 1월 104.6~1026.1 Bq/m³, 2월 96.3~1021.1 Bq/m³로 높게 나타났다. C시설에 사용된 지하수 중 라돈 농도는 A, B시설에 사용된 지하수의 85% 수준이지만, 실내공기 라돈은 동일하게 토양재배 방식을 적용한 B시설의 약 50% 수준으로 나타나 지하수와 실내공기 중 라돈 농도의 연관성은 확인할 수 없었다.

3.3. 시간대별 농도 특성

시간 평균농도가 하루 중 큰 변동을 나타내는 것이 확인됨에 따라 시간대별 농도에 대한 분석을 실시하였다. 하루를 균등하게 오전(6AM~MD), 오후(MD~6PM), 저녁(6PM~MN), 밤(MN~6AM)으로 구분한 후 각 시간대별 농도를 상자그림으로 나타낸 결과는 Fig. 2와 같다. 시간 평균농도의 변동과 마찬가지로 모든 시설에서 라돈 농도 중위값(median)은 아침 또는 야간에 가장 높았고, 오후에 농도가 가장 낮았다. 시간대별 농도의 범위를 보여주는 사분위간 범위(InterQuartile Range)는

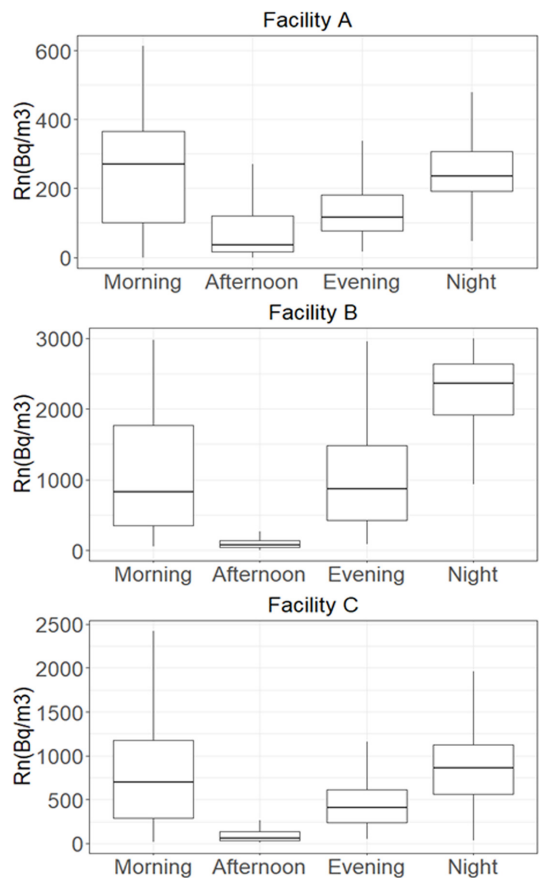


Fig. 2. Indoor radon concentrations at the three facilities during different times of the day.

Table 2. The difference in mean ranks for each group (along with p-values) (*:significant at 95% confidence level)

Group	Facility A	Facility B	Facility C
Morning - Afternoon	18.168 (0.000*)	14.677 (0.000*)	22.470 (0.000*)
Morning - Evening	9.776 (0.000*)	0.237 (1.000)	7.050 (0.000*)
Morning - Night	-2.500 (0.075)	-8.221 (0.000*)	-5.008 (0.000*)
Afternoon - Evening	-8.433 (0.000*)	-19.544 (0.000*)	-15.464 (0.000*)
Afternoon - Night	-20.689 (0.000*)	-26.249 (0.000*)	-27.488 (0.000*)
Evening - Night	-12.293 (0.000*)	-10.490 (0.000)	-12.071 (0.000*)

밤 동안 축적된 라돈으로 인해 최고 농도를 보이다가 환기 시작에 따라 농도가 급격히 감소한 오전 시간대에 가장 크고, 환기가 상당시간 지속된 오후에 가장 작게 나타났다.

시각적으로 확인된 시간대별 농도의 차이가 유의한 지 확인하기 위해 통계분석을 실시하였다. 먼저 Shapiro-Wilk 검정을 이용해 농도 자료의 정규성(normality)을 검정한 결과 모든 시설에서 정규분포를 따르지 않음이 확인되어 비모수적 방법인 Kruskal-Wallis 검정으로 자료를 분석하였다. 95% 신뢰수준에서 모든 시설의 p-value는 0.05미만으로 나타나 시간대별 라돈 농도는 동일하다는 귀무가설이 기각되어 차이가 있음을 확인하였다. 이 후 유의한 차이가 있는 시간대를 확인하고자 Dunn 검정을 이용해 다중비교(multiple comparison)를 수행하였으며¹⁸⁾, 그 결과는 Table 2와 같았다. A시설의 아침과 밤, B시설의 아침과 저녁을 제외한 모든 시간대 사이에는 통계적으로 유의한 차이가 있음이 확인되었다.

3.4. 장비간 측정결과 비교

두 종류의 장비를 이용한 측정결과를 도식화한 결과 Fig. 3과 같이 양호한 직선성을 나타냈으며, 상관계수도 0.99로 높은 상관관계가 확인되었다. 또한 CCC 분석결과 0.929(95% CI : 0.924~0.934)로 나타나 Table 3에 제시된 CCC 판단기준에 따라 두 장비를 이용해 측정된 결과가 전반적으로 유사한 값을 나타낸 것을 알 수 있었다.¹⁹⁾ 이 같은 결과는 챔버 내에서의 다양한 라돈 측정장비를 비교분석한 연구에서 EYE가 표준 측정장비 대비 높은 정확도를 나타낸 결과를 뒷받침하며,²⁰⁾ EYE에 의해 측정된 라돈 농도 자료의 신뢰성을 보여준다.

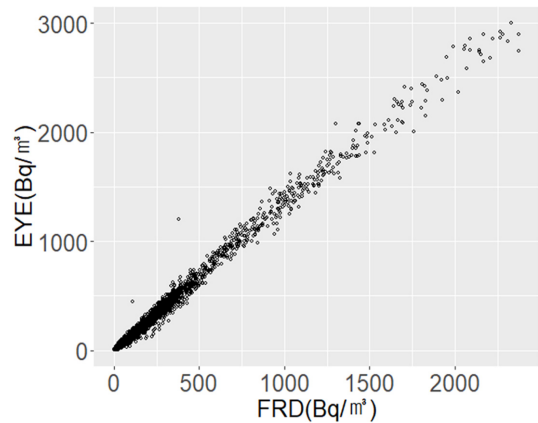


Fig. 3. Plot of values measured using FRD and EYE.

Table 3. Criteria for the strength of agreement based on CCC values

Value of CCC	Strength of agreement
> 0.99	Almost perfect
0.95~0.99	Substantial
0.90~0.95	Moderate
< 0.90	Poor

4. 결 론

본 연구는 라돈과 높은 연관성이 확인된 화강암 지질에 위치한 세종특별자치시 남부지역 수막재배시설의 겨울철 실내공기 중 라돈의 특성을 조사하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연구기간 동안의 라돈 평균농도는 각각 A시설 186.8 Bq/m³, B시설 944.8 Bq/m³, C시설 556.5 Bq/m³로 시설별로 크게 차이가 났으며, 모든 시설에서 권고

기준을 초과하는 높은 수준의 라돈이 형성됨을 확인하였다.

2. A시설과 B시설은 같은 곳에 위치하고, 시설 운영에 동일한 지하수를 사용하지만 실내공기 라돈 농도는 매우 큰 차이를 보여 토양에서의 공기 중으로의 이동이 실내 라돈의 중요한 유입경로임을 확인하였다. 또한 C시설의 지하수 라돈 농도는 A, B시설의 85% 수준이나 공기 중 농도는 C시설과 마찬가지로 토양이 공기에 노출된 B시설의 약 50% 정도로 나타나 지하수와 실내 공기 라돈의 연관성은 확인할 수 없었다.

3. 하루 중 농도 변동은 3개 시설에서 모두 유사한 경향을 나타냈다. 내부 보온을 위해 외기 차단 및 지하수 분사가 시작되는 오후 3시~5시부터 다음날 아침까지는 지속적으로 농도가 증가하였고, 일조로 내부 온도가 높아져 시설 가동이 중단되는 오전 7시~9시부터는 자연환기가 이루어짐에 따라 농도가 낮아져 권고기준 이하의 수준에 도달했다. 또한 오전, 오후, 저녁, 밤 시간대별 농도는 대부분 통계적으로 유의한 차이가 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 시간대별 농도를 고려한 작업시간 변경, 작업 전 환기 등의 적절한 조치를 통해 라돈 노출을 제어할 수 있음을 보여준다.

본 연구는 농촌지역 재배시설에서 실내공기 중 라돈에 대해 조사한 것으로 대상시설에서의 농도 특성 및 경향을 확인해 노출 저감을 위한 기초자료를 마련하였다. 그러나 연구대상인 수막재배시설의 여건으로 인해 일별 환기시간, 지하수 사용량 등 영향인자의 정확한 산정이 이루어지지 못한 한계가 있다. 향후 지질 특성에 기반한 추가적인 연구들을 통해 지질과 밀접한 다양한 시설에서의 라돈 실태를 파악하고 영향인자와의 관계 분석이 이루어진다면, 고농도 라돈 노출 저감을 위한 충분한 자료가 마련될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다

참고문헌

- O. Blanco-Novoa, T. M. Fernandez-Carames, P. Fraga-Lamas, and L. Castedo, "A cost-effective IoT system for monitoring indoor radon gas concentration", *Sensors*, **2018**, 18, 2198.
- M. Torres-Duran, J. M. Barros-Dios, A. Fernandez-Villar, and A. Ruano-Ravina, "Residential radon and lung cancer in never smokers. A systematic review", *Cancer letters*, **2014**, 345, 21-26.
- B. W. Cho, C. O. Choo, M. S. Kim, Y. J. Kim, U. Yun, and B. D. Lee, "Uranium and radon concentrations in groundwater near the Icheon granite", *The Journal of Engineering Geology*, **2011**, 21, 259-269.
- S. S. Oh, S. B. Koh, and S. J. Yong, "Radon and environmental diseases", *Journal of the Korean Medical Association*, **2012**, 55, 223-229.
- International Agency for Research on Cancer, "Man-made mineral fibres and radon", IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, **1988**.
- B. W. Cho, M. S. Kim, T. S. Kim, J. S. Han, U. Yun, B. D. Lee, J. H. Hwang, and C. O. Choo, "Hydrochemistry and Distribution of Uranium and Radon in Groundwater of the Nonsan Area", *The Journal of Engineering Geology*, **2012**, 22, 427-437.
- S. J. Yoon, M. S. Jeong, H. J. Song, E. K. Na, N. Y. Kim, K. A. Kim, S. B. Kwon, I. S. Lee, and J. S. Kim, "Study on Groundwater Quality in Chungcheongnam-do", *The Journal of Environmental Analysis, Health and Toxicology*, **2020**, 23, 222-232.
- S. W. Chang and I. M. Chung, "Analysis of Groundwater Variations using the Relationship Between Groundwater use and Daily Minimum Temperature in a Water Curtain Cultivation Site", *The Journal of Engineering Geology*, **2014**, 24, 217-225.
- M. J. Lee, D. G. Kim, and G. B. Kim, "Evaluation of iron removal efficiency for injection methods of oxygenated water into anoxic aquifers in water-curtain greenhouse regions", *Journal of the Geological Society of Korea*, **2016**, 52, 303-313.
- C. U. Park and H. J. Kim, "Measurement of Inter-Rater Reliability in Systematic Review", *Hanyang Medical Reviews*, **2015**, 35, 44-49.
- B. Ratner, "The correlation coefficient: Its values range between +1/-1, or do they?", *Journal of targeting, measurement and analysis for marketing*, **2009**, 17, 139-142.
- K. A. Kong, "Statistical Methods: Reliability Assessment and Method Comparison", *The Ewha Medical Journal*, **2017**, 40, 9-16.
- J. L. Carrasco, B. R. Phillips, J. Puig-Martinez, T. S. King, and V. M. Chinchilli, "Estimation of the concordance correlation coefficient for repeated measures using SAS and R", *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, **2013**, 109, 293-304.
- R Core Team, R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Com-

- puting, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
15. A. C. George, "The history, development and the present status of the radon measurement programme in the United States of America", *Radiation Protection Dosimetry*, **2015**, 167, 8-14.
 16. R. G. Sextro, "Understanding the origin of radon indoors-Building a predictive capability", *Atmospheric Environment*, **1987**, 21, 431-438.
 17. G. Keller, H. Schneiders, M. Schutz, A. Siehl, and R. Stamm, "Indoor radon correlated with soil and subsoil radon potential-a case study", *Environmental Geology and Water Sciences*, **1992**, 19, 113-119.
 18. A. Dinno, "Nonparametric pairwise multiple comparisons in independent groups using Dunn's test", *The Stata Journal*, **2015**, 15, 292-300.
 19. G. B. McBride, "A proposal for strength-of-agreement criteria for Lin's concordance correlation coefficient", NIWA client report: HAM2005-062, **2005**.
 20. M. A. Carmona and K. J. Kearfott, "Intercomparison of commercially available active radon measurement devices in a discovered radon chamber", *Health physics*, **2019**, 116, 852-861.