

<원저>

코코넛 기반 활성탄 필터의 라돈 제거 효율

안윤진^{1,2)}·김기섭¹⁾·김태환^{1,2)}·김상록¹⁾¹⁾한국원자력의학원 방사선안전관리팀·²⁾고려대학교 융합과학대학원 의학물리학과

Radon Removal Efficiency of Activated Carbon Filter from Coconut

Yun-Jin Ahn^{1,2)}·Gi-Sub Kim¹⁾·Tae-Hwan Kim^{1,2)}·Sang-Rok Kim¹⁾¹⁾Radiation Safety Section, Korea Institute of Radiological and Medical Sciences²⁾Department of Medical Physics, Korea University Graduate School of Convergence Science

Abstract The Korea Institute of Radiological and Medical Sciences plans to produce ^{225}Ac , a therapeutic radio-pharmaceutical for precision oncology, such as prostate cancer. Radon, a radioactive gas, is generated by radium, the target material for producing ^{225}Ac . The radon concentration is expected to be about $2000\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. High-concentration radon-generating facilities must meet radioactive isotope emission standards by lowering the radon concentration. However, most existing studies concerning radon removal using activated carbon filters measured radon levels at concentrations lower than $1000\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. This study measured ^{222}Rn removal of coconut-based activated carbon filter under a high radon concentration of about $2000\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. The ^{222}Rn removal efficiency of activated carbon impregnated with triethylenediamine was also measured. As a result, the ^{222}Rn removal amount of the activated carbon filter showed sufficient removal efficiency in a ^{222}Rn concentration environment of about $2000\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. In addition, despite an expectation of low radon reduction efficiency of Triethylenediamine-impregnated activated carbon, it was difficult to confirm a significant difference in the results. Therefore, it is considered that activated carbon can be used as a radioisotope exhaust filter regardless of whether or not Triethylenediamine is impregnated. The results of this study are expected to be used as primary data when building an air purification system for radiation safety management in facilities with radon concentrations of about $2000\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.

Key Words: Radon, Activated Carbon, Activated Carbon Filter, Radon Removal, Triethylenediamine

중심 단어: 라돈, 활성탄, 활성탄 필터, 라돈 제거, 트리에틸렌디아민

1. 서론

국가통계 포털에 따르면 대한민국의 전립선암 발생률은 1999년 이후 지속적인 증가 추세를 보이며, 2020년 기준 남자의 경우 폐암과 위암 다음으로 3위이고 전체 성별에서 6위이다[1]. 전립선암의 핵의학적 치료 방법에는 대표적으로 방사성의약품 ^{68}Ga , ^{177}Lu 및 ^{225}Ac 가 사용된다. 그중 ^{225}Ac 은 기존 치료 요법에 내성이 있는 환자에게 새로운 치료 방

법으로 적용 가능하여 최근 주목받고 있다[2]. 또한, ^{225}Ac 에서 방출되는 알파선은 인체 투과 거리가 짧아 암 치료 시 주변 정상 조직 보호에 유리하기 때문에 표적 치료의 맥락에서 높은 치료 효과를 보여준다[3].

한국원자력의학원은 전립선암 등 정밀종양 치료를 위한 치료용 방사성의약품 ^{225}Ac 생산 시스템을 계획 중이다. 가속된 양성자를 표적 물질 ^{226}Rn 에 충돌시키면 두 개의 중성자가 빠져나오면서 ^{225}Ac 가 생성되고 방사성 가스인 ^{222}Rn 이 발생한다. 이때 예상되는 ^{222}Rn 농도는 약 $2000\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$

This study was supported by a grant of the Korea Institute of Radiological and Medical Sciences(KIRAMS), funded by Ministry of Science and ICT(MSIT), Republic of Korea, (No. 50422-2023)

Corresponding author: Sangrok Kim, Radiation Safety Section, Korea Institute of Radiological and Medical Sciences, 75, Nowon-ro, Nowon-gu, Seoul, 01812, Republic of Korea / Tel: +82-2-970-1346 / E-mail: kim@kirams.re.kr

Received 28 March 2023; Revised 03 April 2023; Accepted 06 April 2023

Copyright ©2023 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

으로 방사성 가스인 ^{222}Rn 이 시설 외부로 방출되면 내부 피폭으로 이어질 수 있다. 따라서 원자력안전법에 따라 한국 원자력안전위원회가 정하는 배출관리 기준의 제한을 받으며 방사선 안전관리 측면에서 관리될 필요가 있다[4].

^{222}Rn 은 반감기 3.82일의 방사성동위원소이며 무색, 무취의 비활성 기체이다. 환경부에서는 ^{222}Rn 이 인체 내에 흡입되었을 경우 ^{222}Rn 의 자핵종이 기관지 세포에 흡착되고 자연 붕괴하는 과정에서 알파 에너지를 전달하기 때문에 폐암을 일으키는 원인이 되므로 방사선 방호 차원에서 매우 중요하다고 언급하였다[5]. 2009년, 세계보건기구(World Health Organization, WHO)는 ^{222}Rn 이 전 세계 폐암의 최대 15%를 유발한다고 보고하였다[6]. 또한, 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)에서 ^{222}Rn 은 비흡연자 폐암의 가장 큰 원인이며 흡연자의 경우 라돈과 흡연의 시너지 효과로 인해 폐암 위험이 증가하여 1,000명 중 약 62명이 폐암으로 사망하고, 이는 교통사고로 사망할 확률의 약 5배에 해당한다고 발표하였다[7]. 이러한 ^{222}Rn 은 2018년 한국에서 판매된 침대 매트리스에서 기준치 이상의 ^{222}Rn 이 검출된 사고가 발생한 이후로 실내 라돈 노출과 저감 방안에 대한 대중의 관심이 급증하였다[8].

실내 ^{222}Rn 농도 저감을 위한 대표적 방법인 환기는 토양 가스 배출법, 외부 공기 유입법, 차폐시공법과 달리 건물에 추가적인 시공이 필요하지 않은 간편한 방법으로 소개된다[9]. 하지만 환기는 에너지 효율을 고려할 때 모든 환경에 적용하기에는 어려움이 존재한다. 따라서 작업장과 같이 고농도 ^{222}Rn 발생 장소는 국소 배기장치 등을 설치하여 ^{222}Rn 확산을 방지하고 공기 중 ^{222}Rn 농도를 제어할 수 있다.

방사선 관리구역 및 원자력 관리시설은 고농도의 방사성 가스 및 각종 유해가스 제거를 위한 배기 필터를 설치한다. 기존 연구에 의하면 방사성동위원소를 다루는 병원, 연구소, 교육시설 등에 사용하는 배기 필터 중 Charcoal filter에 충전되는 침착활성탄은 20 Å 크기의 미세공이 발달하여 반데르발스(Van der waals) 인력으로 인해 인체에 해로운 각종 유기물과 방사성동위원소를 흡착 제거가 가능하다고 언급되었다[10]. 또한, 활성탄 필터는 낮은 생산 비용과 높은 안정성이 장점이며, 트리에틸렌디아민(Triethylenediamine, TEDA)과 요오드화칼륨(Potassium Iodide, KI)은 활성탄 필터에 가장 일반적으로 사용되는 침착 물질로 2010년부터 2017년까지 최근 연구들은 방사성 요오드 포획을 위한 TEDA 침착활성탄 활용에 중점을 두었다[11]. 또 다른 기존 연구들에 의하면 TEDA는 활성탄의 효과적인 ^{131}I 포집을 목적으로 이용되나 침착 후 활성탄 표면적을 감소시킨다고 언급되었다[12,13].

1900년대 초 Rutherford가 활성탄을 실험실 ^{222}Rn 농도 제어에 이용하였고[14], 이후 다른 연구자들에 의해 활성탄과 ^{222}Rn 흡착에 관한 연구는 계속되었다. Ackley는 상대 습도 10% 미만, 평균 온도 25°C 조건에서 활성탄의 ^{222}Rn 흡착 계수를 검토하여 기체상의 ^{222}Rn 제거를 위한 수학적 유도를 제공하고 이를 통한 흡착기 설계 방법을 제시했다[15]. Shizuma 등은 감마 분광법을 통해 활성탄에 포집된 ^{222}Rn 을 분석하며 이와 같은 방식으로 저농도 ^{222}Rn 을 0.79 Bq·m⁻³까지 측정할 수 있다고 발표하였다[16]. Coleman 또한, 대기 환경에서 ^{222}Rn 을 포집하는 도구로 활성탄을 사용했고, 원자로 시설에서 방출되는 방사성 가스 정화를 위해 코코넛 기반 활성탄을 이용했으며, ^{222}Rn 가스의 온도, 습도에 따른 기체 내 수증기, 기타 경쟁 분자의 농도가 ^{222}Rn 흡착 성능에 미치는 영향에 관해 기술하였다[17]. 본 실험에서 사용된 코코넛 기반 활성탄은 저렴한 재료를 사용하기 때문에 비용 측면에서 효율적인 흡착제로 알려져 있다[18].

하지만 기존 연구 대부분 실내 ^{222}Rn 농도 1000 Bq·m⁻³ 이하 조건에서 진행되었다[19–25]. 그러므로 기존 연구 결과를 본원의 ^{225}Ac 생산 시설에 직접 적용하기에 한계가 존재한다. 따라서, 본 연구는 약 2000 Bq·m⁻³의 고농도 ^{222}Rn 조건에서 코코넛 기반 활성탄 필터 ^{222}Rn 제거 효율을 확인하여 ^{225}Ac 생산 시설의 공기 정화 시스템 설계를 위한 기초 자료를 마련하고자 한다. 또한, TEDA 침착 유무에 따라 두 종류의 활성탄을 구분하여 ^{222}Rn 제거 효율을 비교하였다.

II. 대상 및 방법

1. ^{222}Rn 선원

본 실험은 ^{222}Rn 표준 선원으로 흑색 암석에서 생성된 ^{222}Rn 가스가 이용되었다. 자연 토양에서 발생한 ^{222}Rn 가스를 표준 선원으로 이용한 방법은 Al-Azmi의 기존 연구에서 이용된 바 있다[26]. 또한, 한국 지질 분포 중 옥천대는 흑색 셰일에 우라늄이 함유되어있으며, 이로 인해 다른 지역보다 해당 지역의 토양에서 방사능이 검출될 가능성이 크다는 연구가 발표되었다[27–9]. 이를 참고하여 옥천대 지역에 해당하는 충청북도 보은군 회남면 조곡리 산 53-1에서 흑색 암석 15 kg을 채취하였다. 기존 연구에서 높은 비표면적을 가지는 암석 형태가 더욱 높은 농도의 ^{222}Rn 가스를 생성한다고 언급되었다[30]. 따라서 고농도 ^{222}Rn 가스 포집을 위해 채취된 암석을 직경 5 cm 이하 크기로 파쇄하여 표면적

을 증가시켰다. 파쇄된 흑색 암석은 120°C에서 4시간 동안 열풍 건조 방식을 통해 습기를 제거했다. 습기가 제거된 흑색 암석은 20 L 용량의 밀폐된 ‘소스 챔버’ 안에서 자연적으로 ^{222}Rn 가스를 발생시켰다. 소스 챔버 내부에서 발생한 ^{222}Rn 가스는 또 다른 밀폐 용기에 포집된 후 활성탄 필터를 통과하며 그 농도가 감소한다. 이때 ^{222}Rn 가스가 포집된 밀폐 용기는 본 논문에서 ‘라돈 챔버’라 불린다.

Fig. 1은 라돈가스 포집을 위한 실험 배치도이다. Fig. 1에서 보이는 것과 같이 연결 호스는 소스 챔버(a) 바닥에서 5 cm 떨어진 지점에서 시작되어 20 L 부피의 라돈 챔버(b) 하부로 이어진다. 이때 소스 챔버(a)에 연결된 호스는 내부 흑색 암석 사이에 파묻혀있으며 연결 호스를 통해 이동된 ^{222}Rn 가스는 라돈 챔버(b)에 포집된다. 라돈 챔버에 포집된 ^{222}Rn 가스는 라돈 챔버(b) 상단 5 cm 지점에서 시작되는 연결 호스를 지나 제습제(c)를 거쳐 ^{222}Rn 측정기(d)로 유입된다. ^{222}Rn 측정기로 들어온 ^{222}Rn 가스는 ^{222}Rn 농도 측정이 이루어지고 다시 소스 챔버(a) 상부로 주입되는 순환구조를 가진다. 이러한 과정을 거쳐 10일 뒤, ^{222}Rn 농도 측정값이 $3211 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 에 도달했다. 실험에 필요한 ^{222}Rn 농도를 갖춘 라돈 챔버(b)는 ^{222}Rn 소스로 이용된다.

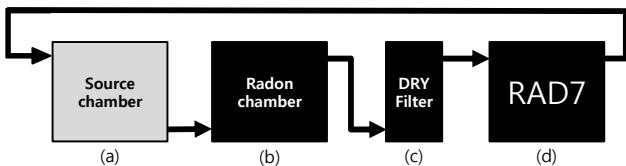


Fig. 1. Radon gas collection layout

Fig. 2는 활성탄 필터 성능 확인을 위한 실험 배치도이다. Fig. 2에서 보이는 것과 같이 Fig. 1에서 배치된 소스 챔버(a)는 제거되고 활성탄 필터(e)가 추가된다. 따라서 라돈 챔버(b)에 포집된 라돈가스는 활성탄 필터(e)를 지나고 제습제(c)를 거쳐 ^{222}Rn 측정기(d)로 유입된다. ^{222}Rn 측정기로 들어온 ^{222}Rn 가스는 라돈 농도 측정이 이루어지고 다시 라돈 챔버(b) 하부로 주입되는 순환구조를 가진다.

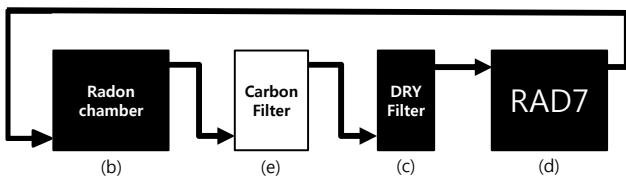


Fig. 2. Activated carbon filter performance test layout

2. 실험에 이용되는 활성탄 필터

본 실험을 위한 활성탄 필터가 자체 제작되었다. 활성탄 필터 제작 시 23 cc 플라스틱 튜브와 N사에서 제작한 코코넛 기반의 활성탄이 이용되었다. 한 개의 23 cc 플라스틱 튜브에 활성탄 17 g을 채운 활성탄 필터는 총 8개가 제작되었다. 이때 활성탄 필터에 사용된 활성탄 질량 17 g은 예비 실험을 통해 결정되었다. Fig. 3은 제작된 필터와 필터의 구성품을 보여준다.

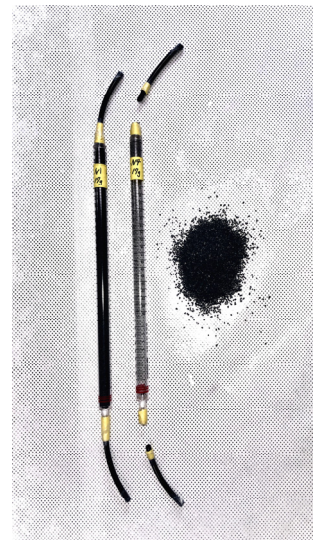


Fig. 3. Activated carbon filter

실험에 사용된 활성탄은 TEDA 침착 여부에 따라 T(TEDA)와 N(None) 두 종류로 분류되고, 다시 활성탄 입자 크기에 따라 네 가지 경우로 재분류되었다. Table 1은 본 연구에서 진행된 8가지 활성탄의 특성을 보여준다.

Table 1. Characteristics of activated carbon used in the experiment

Filter name	TEDA(Triethylenediamine)	Carbon size	
		(mm)	mesh
T1	Impregnation	0.3~0.6	30~50
T2	Impregnation	<1	<18
T3	Impregnation	1~1.18	16~18
T4	Impregnation	>1.18	>16
N1	-	0.3~0.6	30~50
N2	-	<1	<18
N3	-	1~1.18	16~18
N4	-	>1.18	>16

3. 라돈 농도 측정 장비

²²²Rn 측정 장비로 RAD7(Durridge Company, Billerica, USA)이 사용되었다. RAD7은 빠른 응답 속도와 신속한 영점 조정, 측정치의 높은 정확도를 장점으로 기존 연구에서 자주 이용되었다[30-6]. RAD7은 Si 반도체 검출기를 사용하고, ²²²Rn 자핵종인 ²¹⁸Po과 ²¹⁴Po에서 방출되는 알파선을 측정하여 ²²²Rn 농도를 계산한다. 또한, 유량 1 L·min⁻¹의 공기 펌프를 내장하고 있다[37].

기체 시료는 내장된 공기 펌프에 의해 RAD7을 통과한다. ²²²Rn은 기체 습도에 민감하므로 본 실험에서는 RAD7을 통과하는 기체의 습도 관리를 위해 Durridge사의 제습제가 사용되었고 RAD7 설명서에서 요구하는 공기 습도 조건을 만족하게 했다[37]. 습도 관리를 위해 사용된 제습제는 8 mesh 입자에 CaSO₄ 98% 이상을 함유한 것으로, 겉에 CoCl₂를 사용하여 색을 입혀 흡습 상태를 색으로 확인할 수 있다. 이 제습제를 통과한 ²²²Rn 가스는 진행된 모든 실험에서 10% 이하의 습도를 유지하였다.

RAD7은 다양한 측정방식을 제공한다. 본 실험에 적용된 연속 측정방식은 1분간 ²²²Rn 농도 측정과 5분간 휴지 시간을 반복한다. 이러한 연속 측정방식을 통해 1시간 동안 측정된 값은 1회 측정값으로 이용된다. 이때 RAD7 장비는 1회 측정값에 따른 오차를 함께 제공한다. 본 연구에서 언급된 ²²²Rn 농도 측정값의 오차는 RAD7에서 제공된 오차이다.

4. 평가 방법

²²²Rn 제거량(R, 단위 : Bq)은 식 1로 계산한다. C_h는 활성탄 필터 설치 후 h시간 뒤 ²²²Rn 농도(단위 : Bq·m⁻³)이며, Q는 필터를 통과하는 공기량으로 RAD7 내장 펌프의 시간당 유량(12 L)이 적용되었다.

$$R = \sum_{h=0}^h (C_h - C_{h+1}) \times Q \times \frac{1m^3}{1000L} \quad (1)$$

1 g당 ²²²Rn 제거량(R_w)은 식 2로 계산한다. w는 활성탄의 무게이며, 필터 제작에 사용된 활성탄 무게(17 g)가 적용되었다.

$$R_w = R \times \frac{1}{w} \quad (2)$$

활성탄의 ²²²Rn 제거 효율(η, 단위 : %)은 식 3으로 계산한다. C₀는 라돈 챔버에 포집된 ²²²Rn 농도(단위 : Bq·m⁻³),

C_i는 활성탄 필터를 이용한 ²²²Rn 제거 결과(단위 : Bq·m⁻³)이다.

$$\eta = [1 - \frac{C_i}{C_0}] \times 100 \quad (3)$$

III. 결과

1. 라돈 챔버 내부 ²²²Rn 자연 감쇠

²²²Rn이 라돈 챔버에 포집된 후, 소스 챔버가 제거되면 포집된 ²²²Rn은 자연 감쇠로 인해 농도가 감소한다. Fig. 4는 라돈 챔버에 포집된 ²²²Rn의 자연 감쇠를 확인하기 위해 활성탄이 채워지지 않은 필터를 제작하여 연결한 뒤, 시간에 따라 변화하는 ²²²Rn 농도를 측정된 결과이다. ²²²Rn 농도 측정 결과는 최초 ²²²Rn 농도 측정값인 3211 Bq·m⁻³ (±250 Bq·m⁻³)에서 100 Bq·m⁻³ (±25 Bq·m⁻³) 이하에 도달하기까지 총 288 시간 소요되었다. 한 시간 단위로 측정된 ²²²Rn 농도 그래프 결정계수는 0.996으로, 이때 ²²²Rn 붕괴상수는 0.012 hr⁻¹이다.

또한, 측정된 ²²²Rn 농도를 12시간 단위 평균값으로 재가공하였다. 재가공된 ²²²Rn 농도 그래프의 결정계수 0.9993으로 가공 전(0.996)보다 증가하였으며, ²²²Rn 붕괴상수 (0.012 hr⁻¹)는 변하지 않았다.

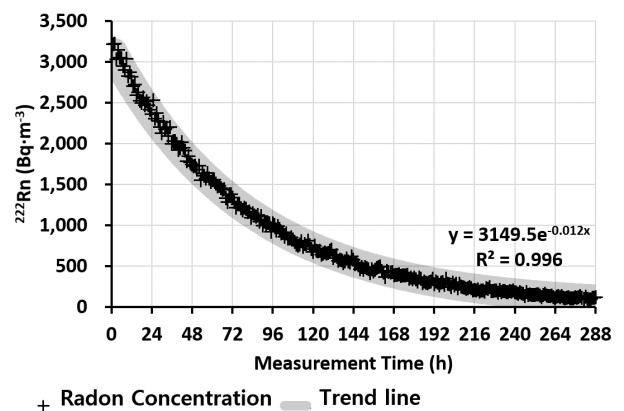


Fig. 4. Concentration change of ²²²Rn inside a radon chamber due to natural attenuation. Measured in hourly increments.

2. 라돈 챔버 내부 ²²²Rn 초기 농도

Table 2는 활성탄 필터 설치 직전 1시간 동안의 라돈 챔버 내부 ²²²Rn 농도이다. 이때 ²²²Rn 농도 범위는 최솟값

1961 Bq·m⁻³부터 최댓값 2466 Bq·m⁻³까지이며, 각 측정값은 최대 ±113 Bq·m⁻³의 오차를 가진다.

Table 2. ²²²Rn concentration before installing activated carbon

Filter name	Initial ²²² Rn Concentration (Bq · m ⁻³)	Error (Bq · m ⁻³)
T1	2340	±110
T2	2107	±104
T3	1961	±101
T4	2411	±112
N1	2075	±104
N2	2466	±113
N3	2347	±110
N4	2380	±111

3. 활성탄 필터의 ²²²Rn 제거량

활성탄 필터 설치 시점부터 필터 성능 종료 시점 이후 1시간까지 라돈 챔버 내부 ²²²Rn 농도를 측정하였다. 이때, 활성탄 필터 성능 종료 시점은 활성탄 필터 설치 후 라돈 챔버 내부 ²²²Rn 농도가 처음 증가한 지점으로 판단하였다.

Fig. 5는 필터(N1, N2, N3, N4) 설치 후 시간에 따라 변화하는 ²²²Rn 농도 측정결과이다. 활성탄 필터 설치 후 라돈 챔버 내부 ²²²Rn 농도는 N1에서 11시간 경과 시 600 Bq·m⁻³, N2에서 5시간 경과 시 554 Bq·m⁻³, N3에서 4시간 경과 시 517 Bq·m⁻³, N4에서 6시간 경과 시 576 Bq·m⁻³으로 각 측정값은 최대 ±57 Bq·m⁻³의 오차를 가진다.

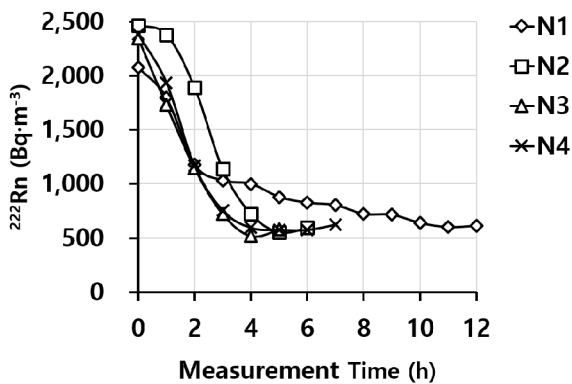


Fig. 5. Changes in ²²²Rn concentration inside the radon chamber, After installing the TEDA-Free activated carbon filter.

Fig. 6은 필터(T1, T2, T3, T4) 설치 후 시간에 따라 변화하는 ²²²Rn 농도 측정결과이다. 활성탄 필터 설치 후 라돈

챔버 내부 ²²²Rn 농도는 T1에서 6시간 경과 시 404 Bq·m⁻³, T2에서 4시간 경과 시 383 Bq·m⁻³, T3에서 5시간 경과 시 360 Bq·m⁻³, T4에서 5시간 경과 시 482 Bq·m⁻³으로 각 측정값은 최대 ±51 Bq·m⁻³의 오차를 가진다.

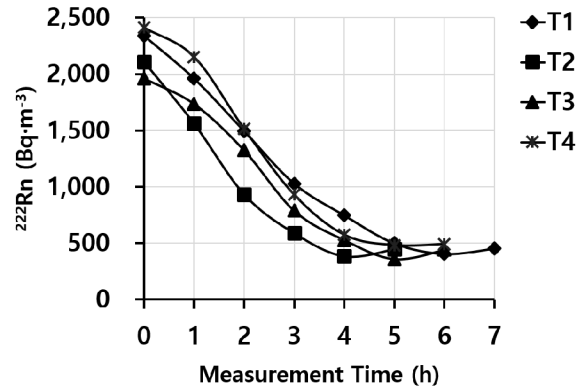


Fig. 6. Changes in ²²²Rn concentration inside the radon chamber, After installing the TEDA-impregnated activated carbon filter.

실험 결과, 활성탄 필터 8개의 성능 종료 시점까지는 최소 4시간에서 최대 11시간이 소요되었다. 또한, 활성탄 필터 설치 전 라돈 챔버에 포집된 ²²²Rn 농도와 비교하였을 때, 라돈 챔버 내부 ²²²Rn 농도는 8번의 활성탄 필터 실험 모두 감소 경향을 보였다.

Fig. 7은 활성탄 필터의 ²²²Rn 제거량(R)을 Bq 단위로 확인하기 위해 식 1을 이용하여 계산한 결과이다. 계산된 ²²²Rn 제거량은 T1에서 23 Bq, T2에서 23 Bq, T3에서 19 Bq, T4에서 23 Bq, N1에서 18 Bq, N2에서 23 Bq, N3에서 22 Bq, N4에서 22 Bq 이다. 그래프 상단에 표기된 시간(h)은 활성탄 필터 성능 종료 시점을 나타낸다.

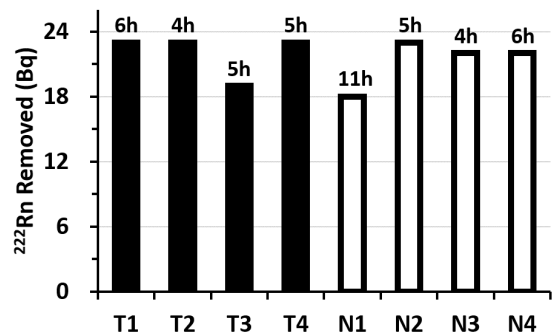


Fig. 7. ²²²Rn removal by activated carbon filter. Calculated by Equation 1. The label at the top of the graph is the filter performance end time.

Fig. 8은 단위 무게당 활성탄 필터의 ^{222}Rn 제거량 그래프이다. 식 2를 이용하여 계산된 1 g당 ^{222}Rn 제거량은 T1에서 $1.35 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$, T2에서 $1.35 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$, T3에서 $1.12 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$, T4에서 $1.35 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$, N1에서 $1.06 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$, N2에서 $1.35 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$, N3에서 $1.29 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$, N4에서 $1.29 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ 이다.

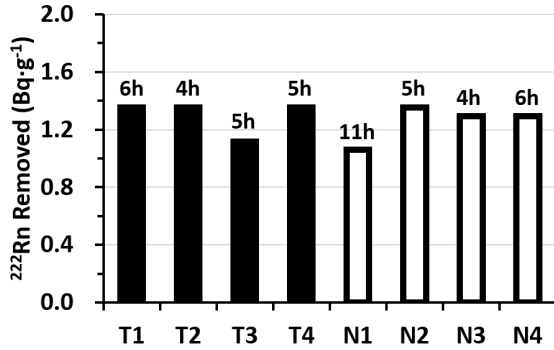


Fig. 8. ^{222}Rn removal per unit weight by activated carbon filter. Calculated by Equation 2. The label at the top of the graph is the filter performance end time.

4. 활성탄 필터의 ^{222}Rn 제거 효율

Table 3은 식 3을 통해 계산된 활성탄 필터 효율(η) 결과로, 효율(η)은 최소 71%부터 최대 83% 범위이다. 또한, 계산된 활성탄 필터 효율(η)은 TEDA가 첨착된 활성탄 필터에서 평균 82%, TEDA가 첨착되지 않은 활성탄 필터에서 평균 76%이다.

Table 3. ^{222}Rn removal efficiency by activated carbon filter. Calculated by Equation 3.

Characteristic	Filter name	Efficiency (%)
TEDA Impregnation	T1	83
	T2	82
	T3	82
	T4	80
TEDA-Free	N1	71
	N2	77
	N3	78
	N4	76

IV. 고찰

^{222}Rn 은 방사성물질로 체내 흡입 시 폐암 발생 확률을 증

가시킬 수 있다고 알려져 있다. 이러한 ^{222}Rn 발생 시설은 원자력안전위원회가 정하는 배출관리기준을 충족시키기 위해 배기 필터를 설치하여 공기 중 ^{222}Rn 농도를 감소시킬 수 있다. 하지만 공기 중 ^{222}Rn 농도 저감에 관련된 기존 연구는 ^{222}Rn 농도 $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 이하의 실내 공기 중 ^{222}Rn 농도 감소를 목적으로 하는 것들이 대부분이다[18]. 이에 본 연구는 방사성의약품 생산 시설과 같은 고농도의 ^{222}Rn 이 발생 되는 환경에 활용하고자 공기 중 ^{222}Rn 농도 약 $2000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 에서 코코넛 기반 활성탄 필터의 ^{222}Rn 제거 효율을 알아보았다.

본 연구에서 진행된 ^{222}Rn 제거량 측정 실험 결과 및 식 1, 식 2를 통해 17 g 활성탄 필터의 ^{222}Rn 제거량과 1 g당 활성탄 필터의 ^{222}Rn 제거량을 계산했다. 그 결과, 활성탄 필터를 통과한 ^{222}Rn 가스는 습도 10% 이하 조건에서 활성탄 17 g당 평균 22 Bq, 1 g당 평균 1.3 Bq의 ^{222}Rn 이 제거되었다. 기존 연구에서 목탄 기반의 ^{222}Rn 흡착 능력은 습도의 영향을 받는다고 발표되었다[38]. 따라서 실제 작업장은 본 실험 조건보다 높은 습도 조건을 가지기 때문에 실제 작업장 환경에서 ^{222}Rn 제거 효율은 본 실험 결과보다 낮아질 것으로 사료된다.

활성탄은 첨착된 TEDA 농도가 증가함에 따라 활성탄 비표면적이 감소했으며 이는 물리적 흡착과 관련이 있음이 보고되었다[13]. 하지만 식 3을 통해 계산된 ^{222}Rn 제거 효율은 TEDA 첨착 여부에 따라 약 6% 차이를 보였다. 이는 RAD7에서 제공하는 측정 오차를 참고하였을 때, 본 실험에서 TEDA 첨착 유무는 ^{222}Rn 제거에 영향을 주지 못한 것으로 판단된다.

기존 연구에서 분말 활성탄은 높은 비표면적으로 인해, 입상 활성탄소보다 높은 ^{222}Rn 흡착 능력이 있음이 발표되었다[25]. 하지만 본 실험에서는 활성탄 입자 크기(0.6 ~ 1.18 mm)에 따른 ^{222}Rn 제거 효율 또한 유의미한 차이를 확인하기 어려웠다. 이에 또 다른 연구에서는 코코넛 기반 활성탄의 미세구조에 따른 ^{222}Rn 흡착 성능을 조사했으며 활성탄의 비표면적과 무관하게 직경 0.5 ~ 0.8 nm의 기공 개수에 따라 달라지는 ^{222}Rn 흡착 성능을 발표했다[31]. 따라서 본 실험에서 사용된 활성탄은 입자 크기(0.6~1.18 mm) 범위 내에서는 일관된 비표면적과 미세공 개수로 인해 ^{222}Rn 제거 효율 차이를 보여주지 못한 것으로 사료된다.

^{222}Rn 반감기 3.82일을 통해 계산된 이론적 붕괴상수는 0.008 hr^{-1} 이다. 반면에 본 연구의 라돈 챔버 내부 ^{222}Rn 자연 감쇠 실험을 통해 얻은 붕괴상수는 0.012 hr^{-1} 이다. 이 같은 이론값과 실험값의 차이는 1시간 단위 측정값을 12시간 평균으로 재가공하였을 때 증가한 결정계수 및 변하지

않은 붕괴상수(0.012 hr^{-1})를 통해 RAD7 측정값 자체의 오차가 아닌, RAD7 측정기에 포함된 건조 필터를 통과하는 과정에서 수분 손실에 의한 추가적인 감소가 발생한 것으로 추정하였다[39]. 하지만 본 연구에서 진행된 실험은 단시간 내에 결과를 확인할 수 있었기 때문에, 기존 연구에서 언급한 바와 같이 ^{222}Rn 의 추가적인 감소를 포함한 자연 감쇠의 영향은 무시할 수 있는 수준이라 판단하였다[18]. 또한, 결정계수 0.996을 통해 1시간 단위 측정값은 해당 농도 범위 ($100 \sim 3211 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) 내에서 신뢰성을 확보하였다.

비록, 진행된 실험은 본 연구 목적인 작업장 환경에 직접 적용하기에 실험 규모와 측정 환경 차이로 인한 기술적 한계가 존재한다. 따라서 추후 진행될 실험에서는 대규모 작업장 환경에서 진행하되, 코코넛 기반 활성탄의 ^{222}Rn 제거 효율 측정 시 활성탄의 무게와 비표면적 및 미세공을 모두 고려하고 활성탄 크기를 더욱 다양한 범위로 확장한다면 고농도 ^{222}Rn 가스 발생 환경에서 공기 중 ^{222}Rn 제거를 위한 활성탄 필터 제작 시 기초 자료가 될 수 있을 것으로 사료된다.

V. 결론

본 연구는 ^{225}Ac 생산 시설의 공기 정화 시설 설계를 위한 기초 자료를 마련하고자 약 $2000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 의 고농도 ^{222}Rn 농도 조건에서 코코넛 기반 활성탄 필터 ^{222}Rn 제거 효율을 측정하였다. 또한, TEDA 침착 유무에 따른 두 종류의 활성탄의 ^{222}Rn 제거 효율을 비교하였다. 본 연구에서 진행된 ^{222}Rn 제거량 측정 결과, 약 $2000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 의 ^{222}Rn 농도 환경에서 활성탄 1 g당 평균 1.3 Bq의 ^{222}Rn 이 제거되는 충분한 효율을 보여주었다. 또한, TEDA 침착활성탄에서 낮은 ^{222}Rn 저감 효율을 보일 것이라 예상하였으나, 본 실험 결과에 따르면 유의미한 차이를 확인하기 어려웠다. 따라서 활성탄의 배기 필터로서 활성탄은 TEDA 침착 여부와 관계없이 사용 가능한 것으로 판단되며, ^{222}Rn 농도 약 $2000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 발생 시설에서 방사선 안전관리를 위한 공기 정화 시스템 구축 시 기초 자료로 활용될 것이라 기대된다. 다만, 본 실험에서 적용된 습도 조절 장치로 인해 발생한 실제 작업장과의 습도와 실험 규모 차이는 본 연구의 제한점이 될 것이다. 추후, 본 연구 결과를 토대로 구축된 배기 시설의 실제 작업장 환경 및 ^{222}Rn 가스 배기량을 고려한 활성탄 필터 효율 측정 등 추가적인 연구가 계속되어야 할 것이다.

REFERENCES

- [1] Ministry of Health and Welfare. Cancer Registry Statistics, 2020, number of cancer cases by 24 carcinomas/gender, relative frequency, crude incidence rate, and standardized ageing rate. 2023.03.22. Available from: https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=117&tblId=DT_117N_A00022&conn_path=I2
- [2] Kratochwil C, Bruchertseifer F, Giesel FL, Weis M, Verburg FA, Mottaghy F, et al. ^{225}Ac -PSMA-617 for PSMA-targeted α -radiation therapy of metastatic castration-resistant prostate cancer. *Journal of Nuclear Medicine*. 2016;57(12):1941-4.
- [3] Sgouros G, Song H, Roeske JC, McDevitt MR, Palm S, Allen BJ, et al. MIRDO pamphlet No. 22 (Abridged): Radiobiology and dosimetry of α -particle emitters for targeted radionuclide therapy. *Journal of Nuclear Medicine*. 2010;51(2):311-28.
- [4] Moo IS, Geun WS, Kim JS, Gi LI, Kim JK, Lee KC, et al. Targeted Alpha-Particle Emitting Radiopharmaceutical Therapy for Precision Oncology. In Korea Institute Of Radiological & Medical Sciences editor. Seoul: Korea; 2019:98-104.
- [5] Ministry of Environment. Guidelines for measuring radon in indoor air [Internet]. Ministry of Environment Regulations No. 202; 2000 [cited 2000 May 22]. Available from: https://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?pagerOffset=6160&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=10264&orgCd=&condition.orderSeqId=243&condition.rnSeq=6162&condition.deleteYn=N&seq=466
- [6] World Health Organization. WHO handbook on indoor radon: A public health perspective [Internet]. Geneva: World Health Organization; 2009. ISBN 9789241547673. Available from: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241547673>
- [7] United States Environmental Protection Agency. Citizen's Guide to Radon The Guide to Protecting Yourself and Your Family from Radon. EPA402-K-12-002. United States Environmental Protection Agency; 2016.
- [8] Lee SM. A Legal Problem and an Improvement Plan

- of NORM(Naturally Occurring Radioactive Materials) Management System Seen Through a Case of a Radon Detection Bed, *Environmental Law and Policy*, 2018; 21:167-99.
- [9] Ministry of Environment. Understanding radon, a natural radioactive substance in daily life [Internet]. Ministry of Environment Spokesperson's Office Publishing; 2016 [cited 2018 Nov 20]. Available from: <https://www.busan.go.kr/nbnews/1350467?curPage=10&srchBeginDt=2018-11-09&srchEndDt=2018-12-09&srchKey=&srchText=>
- [10] Lee KJ, Lee JH, Kim KH, Kwack DW, Jo HD, Ko KM, et al. Study on the Effective Controlling System of Radio-activity Ventilation. *Nuclear Medicine and Molecular Imaging Technology*. 2008; 12(1):91-8.
- [11] Huve J, Ryzhikov A, Nouali H, Lalia V, Aug G, Daou TJ. Porous sorbents for the capture of radioactive iodine compounds: A review. *RSC ADVANCES*, 2018;8(51):29248-73.
- [12] You JY, Choi SS, Lee WJ, Lee JH, Lee SH. Adsorption Kinetics Under Dry and Wet Conditions of TEDA Doped ACF for CH₃I Adsorption. *Polymer(Korea)*, 2019;43(6):846-51.
- [13] Wu LC, Chung YC. Replacement of hazardous chromium impregnating agent from silver/copper/chromium-impregnated active carbon using triethylenediamine to remove hydrogen sulfide, trichloromethane, ammonia, and sulfur dioxide. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 2009;59(3):258-65. DOI: <https://doi.org/10.3155/1047-3289.59.3.258>
- [14] Rutherford E. Absorption of the radio-active emanations by charcoal. *Nature*. 1906;74:634.
- [15] Ackley RD. Removal of radon-220 from HTGR fuel reprocessing and refabrication off-gas streams by adsorption (based on a literature survey). ORNL-TM-4883, Tenn. (USA): Oak Ridge National Laboratory; 1975.
- [16] Shizuma K, Hamanaka SI, Wen XQ, Fukami K, Iwatani K. Airborne radon-222 measurement by active sampling with charcoal adsorption and gamma-ray spectrometry. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 1998;35(10):728-32.
- [17] Coleman RL. Use of activated charcoal for Rn-220 adsorption for operations associated with the uranium deposit in the auxiliary charcoal bed at the molten salt reactor experiment facility [Internet]. United States: N.P., 1999 [cited 2023 Mar 23]. Available from: <https://www.osti.gov/biblio/861749>. doi:10.2172/861749
- [18] Karunakara N, Kumara KS, Yashodhara I, Sahoo BK, Gaware JJ, Sapra BK, et al. Evaluation of radon adsorption characteristics of a coconut shell-based activated charcoal system for radon and thoron removal applications. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2015;142:87-95.
- [19] Choi IH, Kang SS, Lee SM, Yang SW, Kim KT, Park JK. The Study on Reduction of Hazardous Materials using Eco-friendly Charcoal Composite Sheet. *Journal of the Korean Society of Radiology*, 2018;12(5):615-21.
- [20] Cha DW, Kim, SH, Cho SY. Radon reduction efficiency of the air cleaner equipped with a Korea carbon filter. *Journal of Odor and Indoor Environment*, 2017;16(4):364-8.
- [21] Ju MH, Song MS, Lim SK, Kim HD, Go SG, Ahn CS, et al. Comparison measurement analysis of radon gas reduction using activated carbon. *Proceedings of the Korean Society of Radiation Protection Conference*. 2014:516-7.
- [22] Cho YM, Lee HH. Effect of black charcoal and activated carbon for reduction of indoor radon emitted from building materials. *Abstracts of Proceedings of the Korean Radioactive Wastes Society*. 2010: 14-5.
- [23] Ju MH, Song MS, Im SG, Kim HD, Ahn CS, Jang DC, et al. Measurement and analysis of radon gas reduction using synthetic zeolite and activated carbon. *Journal of the Korean Radioactive Waste Society*. 2014;12(2):453-4.
- [24] Choi IH, Kang SS, Jun JH, Yang SW, Park JK. A study of radon reduction using panel-type activated carbon. *Journal of the Korean Society of Radiology*. 2017;11(5):297-302.
- [25] Pyeon SJ, Lee SS. Pore characteristics and adsorp-

tion performance evaluation of magnesium oxide matrix by active carbon particle size. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2018;18(1):59-65.

[26] Al-Azmi D. The use of soil gas as radon source in radon chambers. *Radiation Measurements*, 2009;44(3):306-10.

[27] Jeon HT, Jung MC. Dispersion of toxic elements in the area covered with uranium-bearing black shales in Korea. *Economic and Environmental Geology. Journal of the Korean Institute of Mining Geology*. 1991;24(3):245-60.

[28] Lee JS, Chon HT, Kim KW. Dispersion and enrichment of potentially toxic elements in the Chungjoo area covered with black shales in Korea. *Journal of the Economic and Environmental Geology*. 1996;29(4):495-508.

[29] Kim JS, Chon HT. Dispersion and Enrichment of Potentially Toxic Elements in Chubu Area Covered with Black Shales and Slates in Korea. *Journal of Economic and Environmental Geology*. 1997;30(2): 89-103.

[30] Cho JS, Lee HM, Kim SW, Kim JS. A Study on the Variation of Rn-222 Concentration in Groundwater at Busan-Geumjeong area. *Journal of the Korean Association for Radiation Protection*. 2012;37(3): 149-58.

[31] Wang Q, Qu J, Zhu W, Zhou B, Cheng J. An experimental study on radon adsorption ability and microstructure of activated carbon. *Nuclear Science and Engineering*. 2011;168(3):287-92.

[32] Bikit I, Mrdja D, Bikit K, Grujic S, Knezevic D, Forkapic S, et al. Radon adsorption by zeolite. *Radiation Measurements*. 2015;72:70-4.

[33] Choi IH, Kang SS, Jun JH, Yang SW, Park JK. A Study of Radon Reduction using Panel-type Activated Carbon. *Journal of the Korean Society of Radiology [Internet]*. 2017 Oct 31;11(5):297-302. DOI: <https://doi.org/10.7742/JKSR.2017.11.5.297>

[34] Joo MH, Lim SG. Hanil Nuclear, Inc., assignee. Radon adsorption filter and radon reduction apparatus including the filter [Internet]. Korea patent KR 10-2017-0010005. 2018. Oct 11. DOI: <https://doi.org/10.8080/1020170010005>

[35] Park HH, Jeong E, Kim HJ, Lee J, Lyu KY. Assesment of Indoor Radon Gas Concentration Change of College. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2017;40(1):127-34.

[36] Lee YS, Lee SB, Kang MS, Jeong DH, Kim JH, Oh YS, et al. Radon Hazard Review of Spilled Groundwater and Tap Water in Incheon Metropolitan City Subway Station. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2021;44(6):671-7.

[37] DURRIDGE company Inc. RAD7 Electronic Radon Detector User Manual [Internet]. Billerica, MA 01821 USA; 2023 [cited 2023 Mar 23]. Available from: <http://www.durridge.com/support/product-manuals/>

[38] Pojer PM, Peggie JR, O'Brien RS, Solomon SB, Wise KN. Performance of a diffusion barrier charcoal adsorption 222 Rn monitor under conditions of varying humidity and temperature. *Health Phys*. 1990;58:13-9.

[39] Paschalides JS, Marinakis GS, Petropoulos NP. Passive, integrated measurement of radon using 5A synthetic zeolite and blue silica gel. *Applied Radiation and Isotopes*. 2010;68(1):155-63.

구분	성명	소속	직위
제1저자	안윤진	한국원자력연구원/고려대학교	연수연구원/석사 대학원생
공동저자	김기섭	한국원자력연구원	책임연구기술원
공동저자	김태환	한국원자력연구원/고려대학교	연수연구원/석사 대학원생
교신저자	김상록	한국원자력연구원	선임연구원