

Study on ^{222}Rn reduction rate in boiling groundwater

MoonSu Kim, Hyun-Koo Kim, Sun-Wha Park, Hyoung-Seop Kim, Byoung-Kyu Ju,
Dong-Su Kim, Sung-Jin Cho, Jae-Ha Yang, Oh-Sang Kwon and Tae-Seung Kim[★]

National Institute of Environmental Research

(Received August 4, 2015; Revised October 19, 2015; Accepted October 20, 2015)

가열에 의한 지하수 중 ^{222}Rn 제거율 고찰

김문수 · 김현구 · 박선화 · 김형섭 · 주병규 · 김동수 · 조성진 · 양재하 · 권오상 · 김태승[★]

국립환경과학원

(2015. 8. 4. 접수, 2015. 10. 19. 수정, 2015. 10. 20. 승인)

Abstract: Boiling is an efficient removal method to reduce radon in groundwater when ventilating indoor air. 13 groundwater samples with various radon concentrations were used to evaluate the reduction rate of radon with heating temperature and time. The groundwater samples were obtained by Bladder pump and *on-situ* measurements such as dissolved oxygen (DO) and hydrogen concentration (pH) and so on were carried out by a flow cell system isolated from the ambient atmosphere environment. All samples for measuring radon in groundwater were analyzed by liquid scintillation counter (LSC). The experiment result showed that increasing groundwater temperature enhanced radon removal rate but the initial radon concentration with high level lowered the removal rate. This means that radon reduction in groundwater by heating needs more heating energy and longer heating time with radon concentrations. Radon removal rate in groundwater, therefore, mainly depends on the initial radon concentration, heating temperature, and heating time.

요 약: 지하수 중 라돈은 끓임으로서 쉽게 제거할 수 있다. 다양한 라돈 농도를 가진 13 개 지하수 시료를 이용하여 가열 시간과 온도를 변경시키며 라돈의 제거효율을 평가하였다. 지하수 시료는 Bladder 펌프를 이용하여 채수하였고 용존산소, 수소이온농도 등의 현장수질은 Flow cell을 이용하여 측정 하였다. 경과시간 및 수온 별로 분취한 시료의 라돈 농도는 액체섬광계수기(LSC)로 분석하였다. 실험결과, 온도가 높을수록 경과시간에 따른 지하수 중 라돈의 제거율도 높아지며 지하수 중 라돈의 초기농도가 높을수록 경과시간에 따른 지하수 중 라돈의 제거율은 낮아진다. 즉, 지하수 중 라돈의 농도가 높을수록 가열에 의한 라돈 제거 시 더 많은 시간과 에너지를 필요로 한다. 따라서 지하수 중 라돈 제거율은 주로 라돈초기농도, 가열온도, 그리고 가열시간에 의해 결정된다.

Key words: Radon, Liquid scintillation counter, heating, radon removal rate

[★] Corresponding author

Phone : +82-(0)32-560-8360 Fax : +82-(0)32-563-4102

E-mail : tskim99@korea.kr

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

라돈(^{222}Rn)은 우라늄과 함께 가장 잘 알려진 자연 방사성물질 중 하나이다. 라돈(^{222}Rn)은 인간에게 피폭되는 총 방사선량의 50% 이상을 차지하고 있으며, 우라늄(^{238}U) 붕괴계열에서 만들어진 라듐(^{226}Ra)의 알파 붕괴로부터 생성되는 무색(colorless), 무취(odorless), 무미(tasteless)한 화학적으로 비활성인 기체(chemically-inert noble gas)이다.^{1,2} 라돈(^{222}Rn)은 지표 하 암석 혹은 모암 내에 포획되어 보존되다가 구조활동(geologically structural activity)에 의한 암석의 파괴작용이 일어나면 열극(fissure, fracture, joint, fault etc)을 따라 누출된다.³ 1995년 일본 고베지진 발생시 몇 개월 전부터 지하수 중 라돈의 농도가 평소 4 배 정도 높아지기 시작하다 지진발생 9일전 평소 농도보다 10 배 이상 높은 이상치를 보인 것⁴ 역시 지진과 같은 지질학적 구조활동에 의한 것임을 알 수 있다. 이온화된 라돈 용액관련 연구논문⁵ 의하면, 전기이동(electromigration) 연구결과 라돈은 Rn^{2+} 혹은 불화라돈(RnF^+)의 양이온 형태로도 존재 할 수 있음을 알 수 있다.

라돈은 열극을 채우고 있는 지하수와 함께 지표로 이동하다가 지하수 관정을 통해 지표로 나오게 되는 거동을 보인다. 양수된 지하수 중 라돈은 공기 중으로 방출되어 사람이 흡입 시 인체로 유입되거나 혹은 음용 시 구강을 통해 유입되는 경로를 가진다.^{1,2} 라돈(^{222}Rn)은 흡연 다음으로 높은 폐암 발병인자로 알려져 있어, 미국 환경청은 고농도의 라돈을 함유한 음용 지하수로부터 공공의 건강을 지키며 실내공기 중 라돈의 위해성을 낮출 수 있는 다매체 완화 기법(음용수 중 라돈관리법)을 제안하였다.² 대부분의 라돈 노출은 집과 건축물 아래에 있는 토양 내 라돈이 실내로 스며들어 발생하는 반면, 약 1~2%의 라돈 노출만이 음용 지하수로부터 기인하는 것으로 보고되고 있다.⁶ 라돈에 의한 전체 발암위해도 중 실내공기의 라돈을 흡입하여 폐암에 걸리는 확률이 약 99%이며, 물에 의한 발암 확률은 약 1%로 추정되고 있다. 이 1%의 확률을 다시 구분하면, 물에서 발생한 라돈을 흡입하여 폐암에 걸릴 확률은 약 89%이며, 섭취하여 위암에 걸릴 확률은 약 11%로 추정하였다.¹

물 중 라돈을 저감하는 최적방법으로는 폭기(aeration) 및 활성탄(granular activated carbon filters) 처리법이 널리 알려져 있다.^{2,7,8} 음용 지하수의 경우 실외에서 끓이거나 혹은 환기에 유의하며 실내에서 끓여 마시

는 경우, 간단하게 라돈이 제거된 물을 마실 수 있다. 즉 실내공기 중 라돈농도를 높이지 않는 조건 하에서는 끓이는 것이 음용 지하수 중 라돈 저감을 위해 일반인이 선택할 수 있는 가장 손쉬운 방법 중 하나이다. 하지만 온도 상승에 따른 라돈 저감을 확인할 수 있는 관련 실험 혹은 논문은 찾기 어렵다. 본 연구는 서로 다른 라돈 농도를 가진 지하수를 가열하는 경우와 가열온도를 달리하여 일정하게 유지할 때 시간의 경과에 따른 지하수의 라돈 농도의 변화 및 제거율을 고찰하는데 그 목적이 있다.

2. 실험방법

반감기가 3.82일로 상대적으로 짧은 지하수 중 라돈의 분석을 위해 blader 펌프를 이용하여 현장에서 시료를 채취한 후 초기농도를 알기 위해 시료의 일부를 전처리하였다. 라돈이 함유된 시료를 가열하여 온도별 라돈 제거율을 고찰하기 위하여 실험조건을 조정하였다. 마지막으로 액체섬광계수기를 사용하여 시료 중의 라돈 농도를 측정하였다.

2.1. 시료 채취 및 전처리

라돈 기체의 손실을 피하기 위해 시료와 섬광용액의 혼합은 신속히 이루어졌다. ^{222}Rn 의 짧은 반감기를 고려하여 통상적인 지하수 시료채취방법과는 달리 ^{222}Rn 측정을 위한 시료 채취법에^{9,10} 의거 현장에서 시료채취를 수행하였다.

QED사 휴대용 펌프인 MicroPurge[®]의 Bladder Kit 펌프를 이용하여 교란을 최소화하며 채취하고자 하는 대수층의 지하수 시료를 채수하였다. 또한 MicroPurge[®] MP20 Flow Cell을 이용하여 대기와의 접촉 없이 수소이온농도 및 전기전도도 등의 현장항목 측정을 통해 수질이 안정화됨을 확인 후 분석대상 시료를 준비하였다.

원수의 라돈 농도를 알기 위해 현장에서 22 mL 시료 용기에 미리 준비한 섬광용액(Optiphase Hisafe3) 12 mL와 지하수 시료 8 mL를 첨가하여 5 분간 잘 흔들어 섞고 3 시간 정도 안정화시킨 후 실험실에서 분석하였다. 가열에 의한 물 중 라돈제거율 실험을 위해 시료는 라돈함량이 저농도부터 고농도까지 존재하는 4 개 지역의 지하수공(CW, IC, DJ, and GS wells)에서 수질이 안정화 될 때까지 충분히 양수한 후 4 L PE(Poly Ethylene) 채수병에 공기가 남지 않도록 시료를 가득 채운 후 마개를 닫고 실험실로 가져왔다.

2.2. 실험조건

가열에 의한 지하수 중 라돈제거율 실험은 짧은 라돈의 반감기를 고려하여 두 가지 방법으로 진행하였다. 라돈 농도가 다른 5 개의 시료를 끓는점까지 가열할 때와 라돈 농도가 높은 두개의 지하수 시료를 4 개로 각각 분취하여 가열 온도를 서로 달리하여 일정하게 유지할 때 경과시간별 라돈 제거율을 평가하였다. 먼저 시료를 비커에 200 mL씩 따른 후 hot plate (Wise Stir) 위에 놓고 각각의 시료를 8 mL씩 채취하여 각테일용액(Optiphase Highsafe 3) 12 mL를 미리 담아놓은 PE 바이알(22 mL)에 넣고 30회 이상 세 개 흔든 후 라돈 및 딸핵종의 방사평형을 위해 3 시간 동안 안정화시킨다. 이후 액체섬광계수기(Quantulus™ 1220; Wallac)로 60분 동안 분석한 농도 값들을 초기 값으로 이용하였다. 사용된 hot plate 6 개의 성능을 확인하기 위하여 22 °C 3차 증류수를 200 mL씩 6 개의 비커에 담아 hot plate의 온도를 300 °C로 설정하여 동시에 가열하였다. 증류수 시료가 100 °C에 도달하는 시간은 최소 20 분에서 최대 32 분의 범위를 가져, 각 hot plate 마다 단위시간 당 에너지 공급량이 다름을 보여 주었다(Table 1).

라돈 초기농도가 서로 다른 5 개의 시료를 대상으로 hot plate의 온도를 모두 300 °C로 설정하고 동시에 가열을 시작하였다. 이 후 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 분마다 비커에서 8 mL씩 분취하여 가열 전 시료 포함 총 50 개의 시료를 제작하여 라돈을 분석하였으며, 이 때 2 개 시료에서 수온측정도 병행하였다.

또한, 온도차에 의한 라돈의 제거율을 평가하기 위해, 상대적으로 고농도의 라돈을 함유한 지하수 관정에서 시료를 채취하였다. 200 mL씩 비커에 분취한 시료를 hot plate에 놓고 가열온도를 40, 60, 80, 100 °C

Table 1. Elapsed time to the boiling point of 200 mL distilled water by each hot plate

Hot plate number	Heating time	Heating time (min)			
		up to 40 °C	up to 60 °C	up to 80 °C	100 °C
1		5	9	13	20
2		6	10	16	26
3		5	10	14	21
4		6	11	18	32
5		6	10	17	29
6		6	10	16	27

*initial temperature of samples : 22°C, setting temperature of hot plates : 300°C

로 일정하게 유지시키면서 가열 경과시간에 따라 1개 비커에서 10 개씩 4 개의 비커에서 총 40 개의 시료를 채취하여 분석하였다. 충분한 가열시간 확보를 위해 같은 지하수 관정에서 시료를 한차례 더 채취하여 같은 조건에서 시간을 늘려서 다시 총 40 개의 시료를 분석하였다.

2.3. 분석방법

연구대상 지하수의 수온, 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC), 산화환원전위(Eh), 용존산소(DO), 탁도(Turbidity), 그리고 염도(Salinity)는 현장에서 MicroPurge® MP20 Flow Cell을 이용하여 대기와의 접촉 없이 측정하였다.

본 연구에서 지하수 중 라돈의 농도는 미국 환경청의 공식방법 중 하나이며 북유럽에서도 사용되고¹¹ 있는 액체섬광계수법을^{9,10,12} 이용하여 구하였다. 이 분석 방법은 물 시료내의 알파-베타선과 섬광용액 간의 상호작용으로 발생한 섬광을 측정하여 해당 시료의 방사성 세기를 구하는 방법이다. PerkinElmer사의 Wallac Quantulus™ 1220 ULL (Ultra Low Level) LSC (Liquid scintillation counter)를 사용하여 현장 및 실험실에서 전처리된 시료의 ²²²Rn 방사능 세기를 측정하였다.¹³⁻¹⁵ 식 (1)에 의하여 액체섬광계수기 2대의 ²²²Rn 측정효율을¹³ 구하였으며, 식 (2)로 시료 중의 ²²²Rn 농도를 계산하였다.

$$\epsilon = \frac{R^* - R_0}{A_S(1 - \exp^{-\lambda t}) \times 60} \quad (1)$$

- λ : ²²²Rn 붕괴상수(0.182/일)
- t : 채취 시부터 측정시간까지의 경과시간(일)
- A_S : 표준선원의 방사능(Bq)
- R^* : α -선의 총 피크영역 계수율(cpm)
- R_0 : α -선의 총 피크영역에서의 백그라운드 계수율(cpm)

$$Rn(dpm/L) = \frac{(Rn)_{total}}{V_s} = \frac{CR}{V_s \cdot \epsilon} \cdot e^{\lambda_{Rn} T_D} \quad (2)$$

- $V_s(L)$: 시료의 부피
- $(Rn)_{total}$: ²²²Rn의 계측수
- ϵ : 측정효율
- CR : Count rate(cpm)
- λ_{Rn} : ²²²Rn의 붕괴상수
- T_D : 시료채취 후 계측개시 시점까지의 경과시간(day)

Table 2. Radon activities with heating times and *on-situ* measured values of the sampled groundwaters

ID	Sampling Depth (m)	Sampling Date	Original ²²² Rn (pCi/L)	Analyzed Date	Temp. (°C)	²²² Rn (pCi/L)												
						pH	Eh (mV)	EC (μS/cm)	Elapsed time(min)									
									DO (mg/L)	Turb (NTU)	Salin (PSS)	Temp.(°C)						
												101	117	91	97	26	5	2
CW	115	‘14-6-17	1,595	‘14-6-23	18.8	7.01	54	381	101	117	91	97	26	5	2	0	0	0
						0.52	16.9	0.18	0	1	5	10	20	30	40	50	60	70
IC	90	‘14-6-16	5,626	‘14-6-23	17.5	8.48	14	214	416	396	427	402	269	179	65	16	19	14
						0.7	5.4	0.1	0	1	5	10	20	30	40	50	60	70
DJ	50	‘14-6-17	18,734	‘14-6-23	17.7	8.08	-42	382	1,138	1,149	1,100	937	321	186	124	108	110	64
						0.41	7.3	0.18	0	1	5	10	20	30	40	50	60	70
GS	65	‘14-6-18	47,585	‘14-6-23	17.1	8.68	-115	436	3,653	3,564	3,570	3,320	1,266	272	45	32	35	17
						0.14	35.2	0.21	0	1	5	10	20	30	40	50	60	70
		‘14-7-11	26,684	‘14-7-11	15.7	8.68	-116	442	16,258	15,655	13,711	9,563	174	51	62	77	101	295
						0.1	41.9	0.21	0	1	5	10	20	30	40	50	60	70
									25	38	67	92	100	101	101	101	101	101

3. 결과 및 고찰

원수의 라돈 농도가 서로 다른 4 개의 지하수 관측정에서 5 개의 시료를 채취하여 70분 동안 hot plate 를 300 °C로 설정하여 가열하는 동안 라돈의 농도변화를 살펴보았다. 그리고 이 4 개의 지하수 관측정 중 라돈 농도가 가장 높은 1 개 관측정에서 2차례 시료를 추가 채취하여 시료를 일정 온도별로 유지시킬 때 라돈 제거율을 살펴보았다.

3.1. 가열에 의한 경과시간별 라돈 농도 변동특성

실험 대상인 4 개 관정 5 개 지하수 시료의 현장채취 시 물리화학적 특성은 다음과 같다. 수온은 15.7~18.8 °C로 다소 높은 값을 보이는데 이는 bladder 펌프를 사용하여 채수하는 시간이 bailer 혹은 다른 펌프를 이용하여 채수하는 시간보다 상대적으로 길어 관정 외부 기온의 영향을 받은 것으로 사료된다. 수소이온농도는 모두 7 이상의 값(7.01~8.68)으로 중성내지 약 알칼리성을 보이고 있다. Eh는 -116~54 mV 범위를 가지고, DO는 0.1~0.7 범위를 가져 지표수와는 다른 지하수의 특징¹⁶을 잘 보여주고 있다. EC는 214~442 uS/cm, Salinity는 0.1~0.21 PSS, 그리고 Turbidity는 5.4~54 NTU의 범위를 보였다.

1차 시료 채취는 4 개의 각기 다른 지하수 관측정(CW, IC, DJ, GS)에서 라돈이 가장 높게 나오는 관정 심도구간(115, 90, 65, 50 m)을 대상으로 2014. 6.16~18에 채취하였고, 채취 후 약 6~7일 경과 후 분석을 진행(2014.6.23.)하였다. 채취된 지하수 중 라돈의 초기농도는 1,595~47,585 pCi/L이었으나, 채취 후 일주일 정도 경과 후 가열 실험을 위해 실험실에서 측정된 초기 라돈농도의 범위는 101~3,653 pCi/L로 상대적으로 낮아졌다. 이에 고품량 라돈의 변동특성을 보기위해 2014년 7월 11일 GS 관정에서 추가로 시료채취(현장 초기농도: 26,684 pCi/L)를 하였고 약 5시간 30분 후에 분석을 진행하여 라돈농도 16,258 pCi/L를 구하였다(Table 2).

분석결과에 의하면 모든 시료에서 가열 후 20분경과 시부터 급격한 라돈 농도의 감소를 보이고 있는데, 이는 수온이 80 °C 경과 후 100 °C에 도달하는 과정에서 지하수 중 라돈이 급격히 제거되고 있음을 의미한다(Fig. 1). 특히 지하수 중 라돈 농도가 16,258 pCi/L로 가장 높은 시료는 가열 10 분 후 9,563 pCi/L로 약 41.2% 제거되었으며, 가열 20 분 후 174 pCi/L로 약 98.9% 제거되었다.

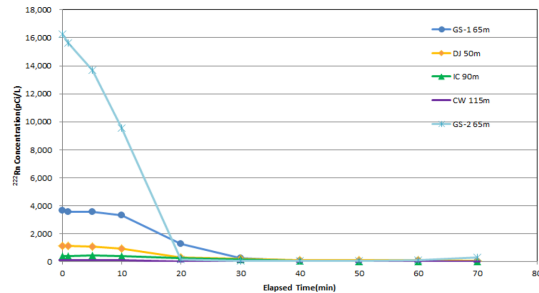


Fig. 1. Radon reduction during heating the samples over time.

3.2. 일정 온도별 경과시간에 따른 라돈 농도 변동특성

가열실험 후 라돈농도가 가장 높은 GS관정 65 m 구간의 지하수 시료를 2차례 채취하였는 바, 지하수의 현장 수질 특성은 다음과 같다. 수온은 1차에 15.8 °C, 2차에 17.1 °C로 다소 높은 값을 보이는데 이는 bladder 펌프 사용에 따른 영향으로 사료된다. 수소이온농도는 8.91과 8.27로 알칼리성을 보이고 있다. Eh는 -67과 -160 mV의 값을 가지며, DO는 0.12와 0.2의 값을 가져 지표수와는 다른 전형적인 환원상태의 지하수 특징¹⁶을 잘 보여주고 있다. EC는 445와 454 uS/cm, Salinity는 0.21과 0.22 PSS, 그리고 Turbidity는 33.2와 17.6 NTU의 범위를 보였다.

1차 시료채취 시(2014.8.6.) 라돈의 현장 초기농도가 46,377 pCi/L인 시료를 다음날(2014.8.7.) 실험실에서 200 mL씩 4 개의 시료로 분취하여 초기농도를 측정 한 후 각각의 시료를 40, 60, 80, 그리고 100 °C의 일정온도로 가열하며 경과시간별 라돈의 저감률을 평가 하였다. 실험실 초기농도가 20,409 pCi/L인 시료를 40 °C로 지속 가열 후 72분이 지나 실험을 종료할 때 13,863 pCi/L의 농도를 보여 라돈이 약 32.1% 제거되었다. 실험실 초기농도가 20,205 pCi/L인 시료를 60 °C로 지속 가열 후 84분이 지나 실험을 종료할 때 7,898 pCi/L의 농도를 보여 라돈이 약 60.9% 제거되었다. 실험실 초기농도가 20,037 pCi/L인 시료를 80 °C로 지속 가열 후 72분이 지나 실험을 종료할 때 2,531 pCi/L의 농도를 보여 미국의 제안치(4,000 pCi/L) 이하로 떨어졌으며 라돈은 약 87.4% 제거되었다. 실험실 초기농도가 19,219 pCi/L인 시료를 100 °C로 지속 가열 후 29 분 경과 시 라돈이 약 84% 제거된 3,080 pCi/L로, 실험을 종료하는 59 분 경과 시 라돈 농도는 33 pCi/L로 초기 농도 대비 99.8% 제거되었다(Table 3). 최대 84 분 동안 진행된 1차 일정온도별 라돈 제

Table 3. Radon activities at fixed water temperatures with time and *on-situ* measured values of the sampled groundwaters

ID	Sampling Depth (m)	Sampling Date	Original ²²² Rn (pCi/L)	Analyzed Date	Temp. (°C)	pH	Eh (mV)	EC (μS/cm)	²²² Rn (pCi/L, C ₀)	Heating Temp. (°C)	²²² Rn (pCi/L)									
						DO (mg/L)	Turb (NTU)	Salin (Pss)	elapsed time(min)	elapsed time(min)										
GS	65	'14-8-6	46,377	'14-8-7	15.8	8.91	-67	445	20,409	40	18,450	18,746	17,766	17,268	17,078	17,071	17,337	16,393	13,863	
									0		32	33	37	42	44	47	49	52	72	
						0.12	33.2	0.21	20,205	60	15,620	15,436	-	14,390	14,213	13,018	13,117	11,792	7,898	
									0		44	45	49	54	56	59	61	64	84	
						0.12	33.2	0.21	20,037	80	14,914	14,675	13,810	12,826	12,148	11,340	9,774	8,183	2,531	
									0		32	33	37	42	44	47	49	52	72	
	0.2	17.6	0.22	19,219	100	12,421	3,458	5,218	3,080	2,517	1,405	1,212	469	33						
				0		19	20	24	29	31	34	36	39	59						
	65	'14-9-24	51,484	'14-9-25	17.1	8.27	-160	454	26,909	40	23,109	21,766	18,677	16,851	14,907	12,957	11,417	9,806	7,982	
									0		50	70	90	110	130	150	170	190	210	
						0.2	17.6	0.22	27,409	60	19,429	18,325	15,069	11,376	9,043	5,800	3,648	1,315	713	
									0		50	60	70	80	90	100	110	130	140	
0.2						17.6	0.22	29,692	80	18,582	16,011	15,270	12,857	9,837	6,528	4,502	2,988	1,854		
								0		50	55	60	65	70	80	90	100	110		
0.2	17.6	0.22	27,517	100	12,261	9,395	6,258	2,922	1,929	741	365	119	78							
			0		39	42	46	49	52	56	59	64	69							

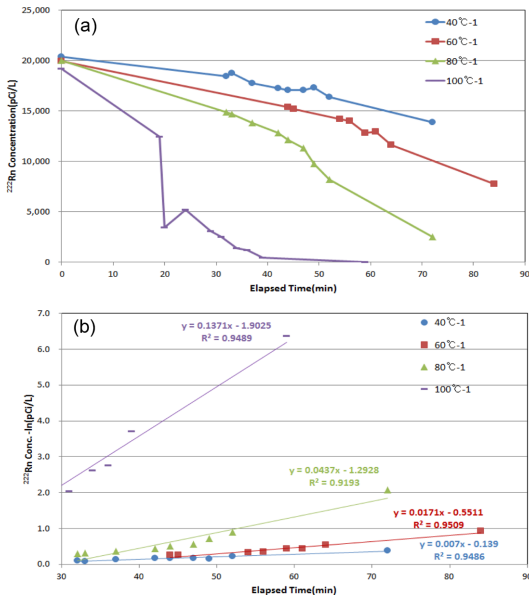


Fig. 2. Radon reduction at fixed water temperature with elapsed time on August 8 (a). Variations of radon reduction constants with elapsed time on August 8 (b).

거 실험 결과 40과 60 °C의 시료는 미국의 음용수 제안치 4,000 pCi/L를 만족시키지 못하였으나 80과 100 °C의 시료는 모두 만족시켰다. 또한 가열을 이용한 지하수 중 라돈 저감 기법에 따른 라돈 저감속도 상수는 40, 60, 80, 그리고 100 °C에서 각각 0.007, 0.0171, 0.0437, 그리고 0.1371 min⁻¹로 계산되었다(Fig. 2).

1차 실험 시 부족한 실험시간을 연장하여 결과를 도출하기 위하여 추가 시료를 채취하였다. 2차 시료채취시(2014.9.24.) 라돈의 현장 초기농도가 51,484 pCi/L인 시료를 다음날(2014.9.25.) 실험실에서 200 mL씩 4개의 시료로 분취하여 초기농도를 측정 한 후 각각의 시료를 40, 60, 80, 그리고 100 °C의 일정온도로 가열하며 경과시간별 라돈의 저감률을 평가하였다. 실험실 초기농도가 26,909 pCi/L인 시료를 40 °C로 지속 가열 후 1차 실험종료 시간과 유사한 70 분 경과 시 라돈의 농도는 21,766 pCi/L로 약 19.1% 제거되었으며, 210분이 지나 실험을 종료할 때 7,982 pCi/L의 농도를 보여 라돈이 약 70.3% 제거되었다. 실험실 초기농도가 27,409 pCi/L인 시료를 60 °C로 지속 가열 후 1차 실험종료 시간과 유사한 80분 경과 시 라돈의 농도는 11,376 pCi/L로 약 58.5% 제거되었으며, 110분 경과 시 라돈이 약 86.7% 제거된 3,648 pCi/L로 미국의 제안치 이하로 떨어졌으며 140분이 지나 실험을 종료할

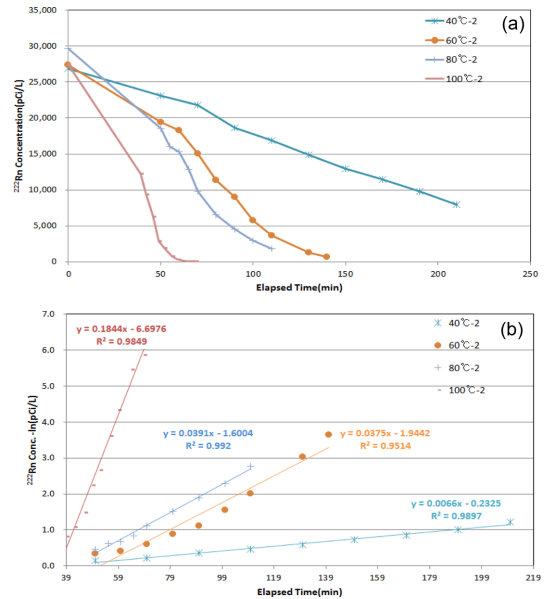


Fig. 3. Radon reduction at fixed water temperature with elapsed time on September 25 (a). Variations of radon reduction constants with elapsed time on September 25 (b).

때 713 pCi/L의 농도를 보여 라돈이 약 97.4% 제거되었다. 실험실 초기농도가 29,692 pCi/L인 시료를 80 °C로 지속 가열 후 1차 실험종료 시간과 유사한 70분 경과 시 라돈의 농도는 9,837 pCi/L로 약 66.9% 제거되었으며, 100분 경과 시 라돈이 약 89.9% 제거된 2,988 pCi/L로 미국의 제안치 이하로 떨어졌으며 110 분이 지나 실험을 종료할 때 1,854 pCi/L의 농도를 보여 라돈이 약 93.8% 제거되었다. 실험실 초기농도가 27,517 pCi/L인 시료를 100 °C로 지속 가열 후 49분 경과 후 미국의 제안치 이하인 2,922 pCi/L로 89.4% 제거되었으며, 1차 실험 시 종료 시간과 같은 59분 경과 시 라돈의 농도는 365 pCi/L로 약 98.7% 제거되었으며 69 분이 지나 실험을 종료할 때 78 pCi/L의 농도를 보여 라돈이 약 99.7% 제거되었다(Table 3). 최대 210 분 동안 진행된 2차 일정온도별 라돈 제거 실험 결과 40 °C의 시료는 미국의 음용수 제안치 4,000 pCi/L를 만족시키지 못하였으나 60, 80, 그리고 100 °C의 시료는 그 값을 모두 만족시켰다. 또한 가열을 이용한 지하수 중 라돈 저감 기법에 따른 라돈 저감속도 상수는 40, 60, 80, 그리고 100 °C에서 각각 0.0066, 0.0375, 0.0391, 그리고 0.1844 min⁻¹로 계산되었다(Fig. 3).

4. 결 론

지하수 중 라돈을 저감하는 방법의 하나로서 가열 온도 및 가열 시간별에 따른 지하수 중 라돈 농도의 변화 및 제거율을 고찰하였다. 가열시 경과시간별 라돈 농도의 변동은 초기농도 16,258 pCi/L 이하의 모든 시료들의 경우 물이 끓기 시작하는 20분 이내에 라돈이 대부분 제거되었다. 일정 수온별 라돈 제거율을 고찰한 결과, 초기 농도가 19,219~20,409 pCi/L의 범위를 가진 4 개 시료의 경우 40과 60 °C의 시료는 72분과 84 분 경과 시 까지 미국의 제안치(4,000 pCi/L) 이하로 저감되지 않았다. 그러나 일정 수온이 80과 100 °C의 시료는 72 분과 29 분 경과 시 모두 4,000 pCi/L 이하로 떨어졌으며 이때의 농도는 각각 2,531 pCi/L와 3,080 pCi/L였다. 최대 210분 까지 수행된 일정 수온별 라돈 제거율을 고찰한 결과, 초기 농도가 26,909~29,692 pCi/L의 범위를 가진 4 개 시료의 경우 40 °C 시료를 제외하고는 모두 미국의 제안치 이하로 저감되었다. 수온이 60, 80, 그리고 100 °C의 시료는 110, 100, 그리고 49 분 경과 시 모두 4,000 pCi/L 이하로 떨어졌으며 이때의 농도는 각각 3,648, 2,988, 2,922 pCi/L였다. 따라서 지하수 중 라돈의 농도가 높을수록 가열에 의한 라돈 제거 시 더 많은 시간과 에너지를 필요로 함을 의미하며 지하수 중 라돈 제거율은 라돈초기농도, 가열온도, 그리고 가열시간의 함수임을 지시한다.

감사의 글

이 연구는 국립환경과학원 ‘지하수 중 자연방사성 물질 함유실태 조사’ 연구의 일환으로 수행되었다.

References

1. National Academy of Sciences, ‘Risk Assessment of Radon in Drinking Water’, <http://www.nap.edu/catalog/6287.html>, 1999.
2. US EPA, ‘National Primary Drinking Water Regulations’; Radon-222, Federal Register, Proposed Rules, **64**(211), 1999.
3. H. T. Jeon, J. D. Kim, O. B. Kim, K. W. Min, Y. S.

- Park and J. H. Yun, ‘Applied Geochemistry’, Seoul National University Press, South Korea, 1997.
4. G. Igarashi, S. Saeki, N. Takahat, K. Sumikawa, S. Tasaka, Y. Sasaki, M. Takahashi and Y. Sano, ‘Ground-Water Radon Anomaly Before the Kobe Earthquake in Japan’, *Science*, **269** (1995).
5. L. Stein, ‘Ionic Radon Solutions’, *Science*, **168** (1970).
6. US EPA, Report to Congress: ‘Radon in Drinking Water Regulations’, www.epa.gov/safewater, EPA 815-R-12-002, 2012.
7. Radiation and Nuclear Safety Authority, ‘Implementation of Community Legislation on Levels of Radioactivity in Drinking Water’, European Commission under Contract Number TREN/04/NUCL/SI2.378317, Finland, 2005.
8. WHO, ‘Guidelines for Drinking-water Quality’, Fourth Edition, 2011.
9. US EPA, Method 913: ‘Radon in Drinking Water by Liquid Scintillation’, Environmental Monitoring and Support Laboratory, Las Vegas, NV, 1991.
10. Standard Method, 21st Edition, SM7500-Rn, 2005.
11. Pia Vesterbacka, ‘²³⁸U-Series Radionuclides in Finnish Groundwater-Based Drinking Water and Effective Doses’, STUK-A213, 2005.
12. H. S. Shin, C. W. Lee, M. H. Lee, Y. H. Cho, K. H. Hong and G. S. Choi, *Anal. Sci. Technol.*, **12**, 428-435 (1999).
13. D. H. Jeong, M. S. Kim, H. K. Kim, H. J. Kim, S. H. Park, J. S. Han, B. K. Ju, S. H. Jeon and T. S. Kim, *Anal. Sci. Technol.*, **26**, 86-90 (2013).
14. M. S. Kim, S. J. Yu, D. H. Kim, J. K. Yoon, H. J. Noh, H. S. Jeong, D. I. Jung, D. H. Jeong, B. K. Ju, T. S. Lim, Y. H. Park and S. K. Hong, ‘An investigation on natural radionuclide levels in groundwater (III)’, NIER Report, 2009.
15. M. S. Kim, T. S. Kim, H. K. Kim, D. S. Kim, D. H. Jeong, B. K. Ju, J. K. Hong, H. J. Kim, S. H. Park, C. H. Jeong, B. W. Cho and J. S. Han, *J. Soil Groundw. Environ.*, **18**, 19-31 (2013).
16. J. S. Han, ‘Groundwater Environment and Contamination’, Park-Young-Sa, 1999.