

《原著》

소규모 간이상수도 시설에서 수온과 폭기량 변화에 따른 수중 라돈 제거 효율에 관한 연구

김현구¹ · 최정수¹ · 주현종^{2*} · 김성철³

¹경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과

²경기대학교 환경에너지공학과

³벽산파워 주식회사

A Study on Radon Removal Efficiencies in Drinking Water according to the Variations of Water Temperature and Aeration Rate in Small Waterwork Facility

Hyun Gu Kim¹ · Jung Soo Choi¹ · Hyun Jong Joo^{2*} · Sung Chul Kim³

¹Department of Environmental Energy Engineering, Graduate School Kyonggi University

²Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University

³Byuck-san power

ABSTRACT

Radon, which is one of the radioactive elements in the natural world, exists in the atmosphere and water. When this element inflows into the human body, it carries the risks of developing lung cancer and stomach cancer. Therefore, in this study, an effective 10 L scaled reactor was produced to mitigate radon in water and the radon mitigation efficiency in water following the changes in water temperature and amount of aeration were evaluated. Based on this, the radon mitigation efficiency (SRRR; Specific radon removal rate) was derived per unit air volume. According to the study result, when water temperature increased from 10°C to 16°C, the SRRR value increased from 95 nCi/m³·L to 134.4 nCi/m³·L, and when the amount of aeration increased from 0.2 L/min to 1 L/min, the SRRR value decreased from 198.1 nCi/m³·L to 72.2 nCi/m³·L. Therefore, based on the experimental results, it is considered that it can be applied as a examination factor and objective indicator during the design of future radon-in-water mitigation systems.

Key words : Radon, Water temperature, Aeration rate, Specific radon removal rate

1. 서 론

라돈은 공기, 물, 토양 등 자연계에 널리 존재하는 무색, 무취, 무미의 방사성 물질로, 사람의 감각으로는 감지되지 않는 물질이다. 이러한 라돈은 숨을 쉬거나 물을 마실 때 등 여러 경로로 인체 내에 유입될 수 있으며 폐암, 위암을 유발하는 위해성을 지니고 있다. 미국 EPA에서는 미국인의 연간 폐암 사망자의 10% 이상인 약 20,000명 정도가 라돈의 누적폭로에 의한 것으로 보고하고 있으며 흡연 다음의 폐암 유발요인으로 간주하여 수중 라돈 규제기

준을 4,000 pCi/L로 설정하고 있다(EPA, 2003). 반면 국내의 경우, 1998년도 대전지역 지하수에서 우라늄이 검출됨에 따라 지하수의 자연방사성물질 실태조사를 추진 중에 있으나 자연방사성물질 중 우라늄만 수질감시항목으로 지정하고 있으며 라돈의 경우 특별한 규제기준 및 대책이 마련되어 있지 않다(MOE, 2011).

수중 라돈의 제거방법으로는 폭기, 활성탄, 역삼투 등을 이용한 방법이 있으며 이러한 방법을 이용하여 수중 라돈을 제거할 경우 90% 이상의 제거효율을 나타낸다고 보고되고 있다(Huikuri et al., 1998; Kinner et al., 1988).

*Corresponding author : hjjoo@kyonggi.ac.kr

원고접수일 : 2013. 1. 28 심사일 : 2013. 6. 13 게재승인일 : 2013. 6. 18

질의 및 토의 : 2013. 8. 31 까지

또한 Schubert et al.(2011)의 연구에서는 공기주입법(Air sparging)을 통한 지하수 라돈 제거 시 초기 라돈 농도 대비 약 60%까지의 제거효율을 낸다고 보고하고 있다. 국내 라돈 연구의 경우 토양 가스 중 라돈의 농도가 여름철에 가장 높게 측정되며, 겨울철에 가장 낮게 측정되어 토양 내부 온도와 대기 온도의 변화가 라돈의 장기적 변화에 큰 영향을 미친다는 연구(Moon et al., 2009)와 기반암의 종류 및 토양의 지형적 구배가 라돈 농도에 중요한 영향을 미친다는 연구(Kim, 2010) 등의 수리지질학적 연구가 수행되었다. 또한 지하수로부터 방출되어 가옥의 실내에 존재하는 라돈에 의한 체내축적량을 평가한 결과 실내 라돈농도 분포의 상한치에 노출된 폐 조직 내 라돈 축적량은 평균 실내 라돈농도에 노출되었을 경우에 비하여 2배 정도 높게 나타난다는 실내공기에 관한 연구(Yu and Han, 2002)와 같이 발생 현황에 관하여 관심이 집중되어 있으며 수중 라돈 제거에 관한 전문적인 연구는 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 수온과 폭기량의 조건별 변화를 통하여 제거되는 수중 라돈 특성을 도출하고자 하며 수온과 폭기량과의 상관관계를 평가하고자 한다.

이에 따라 본 연구에서는 실험실 규모의 반응기를 제작 운전하였으며 수온과 폭기량을 중간 변수로 하여 단위 체적 및 공기량 당 라돈 제거율(SRRR : Specific Radon Removal Rate, nCi/m³·L)을 도출하였다. 수중 라돈의 경우, DurrIDGE사의 모델 RAD7을 이용하여 측정하였으며 이러한 연구는 폭기 및 수온 변화에 의한 수중 라돈의 변화를 예측하고 관리하는데 있어 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 연구방법

2.1. 실험 방법

본 연구에 사용된 반응기의 구성 및 형태를 Fig. 1에 나타내었다. 실험실 규모의 반응기는 아크릴을 이용하여 유효용량 10 L로 제작하였으며 반응기 상부는 폭기에 의한 라돈 탈기 후 수중으로 용해되는 것을 방지하기 위하여 개방형 구조로 제작하였다. 반응기 외부에는 수온 변화를 위한 항온수조를 설치하였으며 항온수조의 수온을 일정하게 유지하기 위하여 PID 제어에 의하여 정밀한 온도 제어가 가능한 Bath Circulator(Jeio tech, RW-0525G)를 설치하였다. 또한 반응기 폭기를 위하여 Air pump(LP-30A)에 공기유량계(Dwyer RMA)를 설치하여 폭기량을 조절하였다.

유입 원수의 경우 수중 라돈이 비교적 고농도(4,000

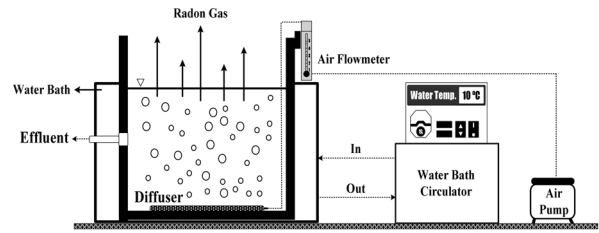


Fig. 1. Schematic diagram of the laboratory scale reactor.

pCi/L 이상)로 검출되어지는 Y군 간이상수도 시설 지하수 취수 펌프에서 채수하였으며 대상 지하수의 수질 특성은 pH 6.5, EC 227 μS/cm, 수온 15.2°C, NO₃-N 0.1 mg/L, Cl⁻ 3.4 mg/L, DO 3.9 mg/L로 나타났다. 채수방법은 한국기초과학지원연구원의 채수방법에 의거하여 실시하였으며 채수 후 수중 라돈 탈기에 의한 분석 오차를 최소화하기 위하여 2시간 이내에 실험을 진행하였다.

2.2. 수온과 폭기량 변화에 따른 SRRR 도출

본 연구에 사용된 유입수는 조건별 실험 기간 동안 10 L로 고정하여 실험을 실시하였으며 조건별 운전기간 동안의 유입수 평균 수중 라돈 농도는 6,748 pCi/L (6,130~7,540 pCi/L)로 나타났다. 또한 수온과 폭기량 변화에 따른 SRRR 도출을 위해 수온을 10, 12, 14, 16°C로 설정하였으며 각 수온별 폭기량의 경우 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 L/min로 동일하게 유지하였다. 폭기량에 따른 채수 시기의 경우 각 폭기량별 10, 20, 30, 40, 50, 60 min에 채수하여 sample 분석을 실시하였으며 실험 기간 동안의 운전조건을 Table 1에 나타내었다.

2.3. 수중 라돈 분석 방법

수중 라돈 분석을 위한 측정 장치는 DurrIDGE사의 RAD7으로 이는 대기 또는 수중 라돈 함량을 측정하는데 사용되고 있다. 분석과정은 5분 동안 공기를 발생시켜 시료 내 수중 라돈을 기기 내부의 공기 중으로 탈기시키며, 이후 5분간 평형상태를 위한 지연시간이 있고, 다음 20분간 4회의 측정을 실시하며 이에 따른 평균값으로 수중 라돈 농도를 결정하였다. 또한 시료 분석 후 RAD7의 공기 배기를 실시하여 장치 내 잔류 라돈을 제거함으로써 추가 분석의 오차를 최소화 하고자 하였다(DurrIDGE Co., 2009).

3. 결과 및 고찰

3.1. 수온 및 폭기량 변화에 따른 모드별 운전결과

해당 모드별 운전 결과를 Table 2에 나타내었으며, 운

Table 1. Operation conditions of the laboratory-scale reactor

Constituent	mode 1 (10°C)	mode 2 (12°C)	mode 3 (14°C)	mode 4 (16°C)
Radon Conc. (pCi/L)	6,470 (6,130~6,820)	6,814 (6,330~7,380)	6,768 (6,230~7,230)	6,942 (6,230~7,540)
Aeration time (min)	10, 20, 30, 40, 50, 60			
Air flow (L/min)	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1			

Table 2. Removal efficiencies in the laboratory-scale reactor

Constituent		Radon concentration (pCi/L)							Removal Efficiency (%)
Temp. (°C)	Air flow (L/min)	Influent	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	
10°C	0.2	6,820	6,160	5,430	5,020	4,540	4,280	3,960	41.9
	0.4	6,360	5,860	4,940	4,230	3,830	3,430	2,880	54.7
	0.6	6,460	5,560	4,630	3,840	3,160	2,630	2,040	68.4
	0.8	6,130	5,160	4,080	3,260	2,540	1,780	1,020	83.4
	1.0	6,580	5,830	4,330	2,760	1,860	1,140	563	91.4
12°C	0.2	6,920	6,130	5,740	5,360	4,960	4,280	3,780	45.4
	0.4	6,330	5,560	4,780	4,060	3,440	2,930	2,580	59.2
	0.6	7,380	5,140	4,320	3,560	2,840	2,230	1,360	81.6
	0.8	6,880	5,940	4,830	3,260	2,540	1,880	980	85.8
	1.0	6,560	5,260	4,120	2,920	1,830	1,030	280	95.7
14°C	0.2	7,230	6,540	5,920	5,220	4,730	4,110	3,630	49.8
	0.4	6,960	5,880	5,030	4,340	3,670	3,010	2,480	64.4
	0.6	6,230	5,410	4,730	3,850	2,860	2,030	1,040	83.3
	0.8	6,580	5,320	4,340	3,640	2,790	1,730	540	91.8
	1.0	6,840	4,820	3,880	2,830	1,760	864	153	97.8
16°C	0.2	7,540	6,350	5,460	4,840	4,030	3,360	2,880	61.8
	0.4	7,060	5,840	5,010	4,220	3,380	2,640	1,940	72.5
	0.6	6,230	5,030	4,110	3,380	2,480	1,520	825	86.8
	0.8	6,840	5,730	4,120	3,040	2,260	1,040	168	97.5
	1.0	7,040	5,420	3,960	2,870	1,440	362	16	99.8

전기 동안 유입수의 라돈 농도는 수온 10, 12, 14, 16°C에서 각각 평균 6,470, 6,814, 6,768, 6,942 pCi/L로 나타났다. 10°C의 경우 폭기량 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 L/min에서 60 min 후 방류수 라돈 농도는 각각 3,960, 2,880, 2,040, 1,020, 563 pCi/L로 초기 약 41.9%의 제거율이 점진적으로 증가하여 최종 약 91.4%까지 상승하였으며 12°C의 경우 방류수 라돈 농도는 각각 3,780, 2,580, 1,360, 980, 280 pCi/L로 초기 약 45.4%의 제거율이 최종 약 95.7%까지 증가하는 경향을 보였다.

14°C의 경우 방류수 라돈 농도는 각각 3,630, 2,480, 1,040, 540, 153 pCi/L로 초기 약 49.8%의 제거율이 점진적으로 증가하여 최종 약 97.8%까지 상승하였으며 16°C의 경우 방류수 라돈 농도는 각각 2,880, 1,940, 825, 168, 16 pCi/L로 초기 약 61.8%의 제거율이 최종

약 99.8%까지 증가하여 10°C, 12°C, 14°C에 비하여 높은 수치를 보였다. 폭기량에 따른 수중 라돈 제거 효율은 0.6 L/min에서 30분간 폭기할 경우 모든 수온 조건에서 4,000 pCi/L 이하의 방류수 평균 농도를 보였으며 폭기량이 증가할수록 제거 효율 또한 증가하는 것으로 나타났다. 결과적으로 폭기량을 1 L/min 주입시 수중 라돈 제거 효율은 모든 운전조건에서 평균 90% 이상을 나타냈으며 수온이 증가할수록 제거되는 라돈 농도 또한 증가하는 것으로 나타났다. 수온과 폭기량에 따른 수중 라돈의 평균 제거 효율 변화를 Fig. 2에 나타냈다.

Majareshin et al.(2012)의 온천지역에서의 수온 및 폭기량 변화에 대한 수중 라돈 제거 연구에서 수온과 폭기량이 증가할수록 수중 라돈 제거 효율이 지속적으로 증가하는 것으로 보고하고 있다. 본 연구에서는 수온과 폭기

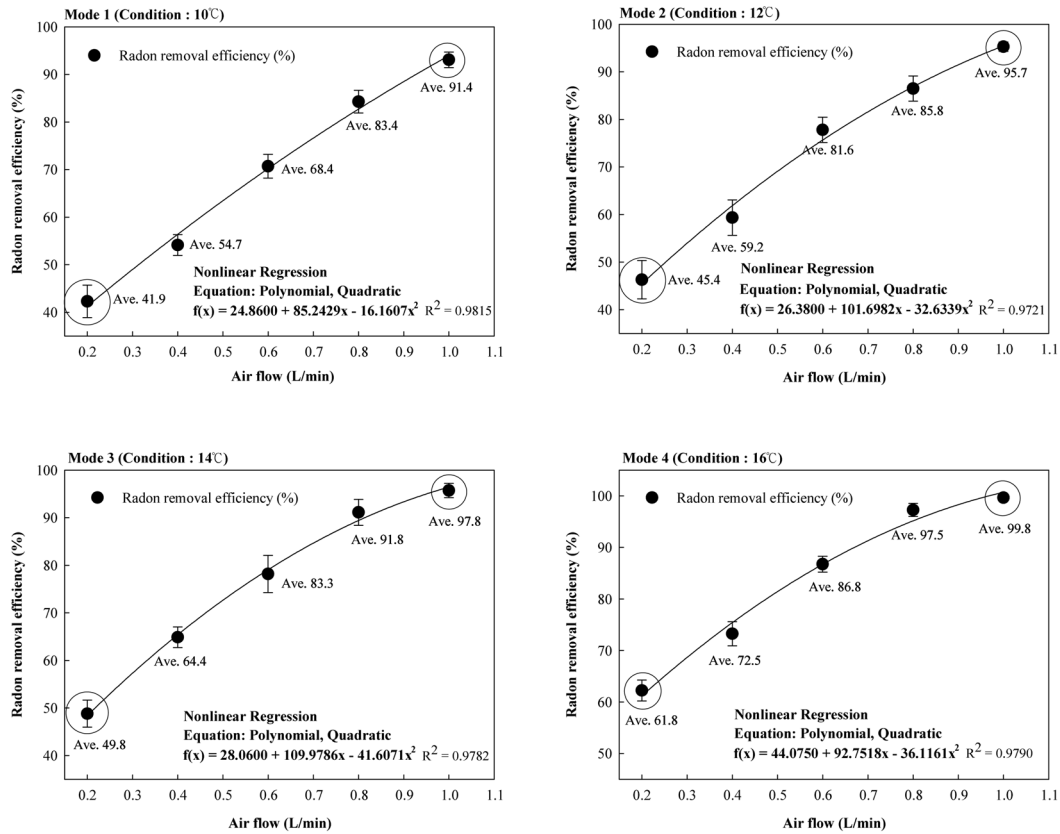


Fig. 2. Result of Radon removal efficiencies with Air flow and Temperature.

Table 3. The SRRR data with water temperature and air flow

Constituent		SRRR (nCi/m ³ ·L)					Ave.
Temp.	Air flow	0.2 L/min	0.4 L/min	0.6 L/min	0.8 L/min	1 L/min	
10°C		158.9	96.7	81.9	71.0	66.9	95.0
12°C		174.4	104.2	83.6	81.9	69.8	102.8
14°C		200.0	124.4	96.1	83.9	74.3	115.7
16°C		258.9	142.2	100.1	92.7	78.0	134.4
Ave.		198.1	116.9	90.4	82.4	72.2	
Regression analysis		Temp. vs. SRRR Nonlinear regression polynomial quadratic $f(x) = 146.9050 - 11.6787x + 0.6719x^2$ ($R^2 = 0.8119$)					
		Air flow vs. SRRR Nonlinear regression logarithm 2 parameter I $f(x) = 60.5547 - 79.2179 * \ln(x)$ ($R^2 = 0.9117$)					

량에 대한 상관관계를 회귀분석을 통해 살펴보았으며 수 온 및 폭기량이 증가할수록 수중 라돈 제거 효율 또한 증가하는 것으로 나타났다. 또한 회귀분석을 통한 함수형 태별 R² 값을 비교한 결과 2차 함수 형태에서 가장 높은 R² 값을 나타냈다. 이는 수온의 증가로 인하여 폭기를 통한 수중 라돈이 대기중으로 탈기되어지는 전환율이 증가 하였기 때문인 것으로 판단되어진다. 따라서 수온과 폭기

량은 수중 라돈 제거에 있어서 중요한 인자로 사용되어질 수 있으며 또한 이와 같은 결과를 토대로 SRRR과의 특 성을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2. 수온 및 폭기량 변화에 따른 SRRR 특성

본 연구에서는 간이상수도에서 검출되어지는 수중 라돈 제거를 위해 향후 라돈 제거 설계인자로 활용될 수 있는

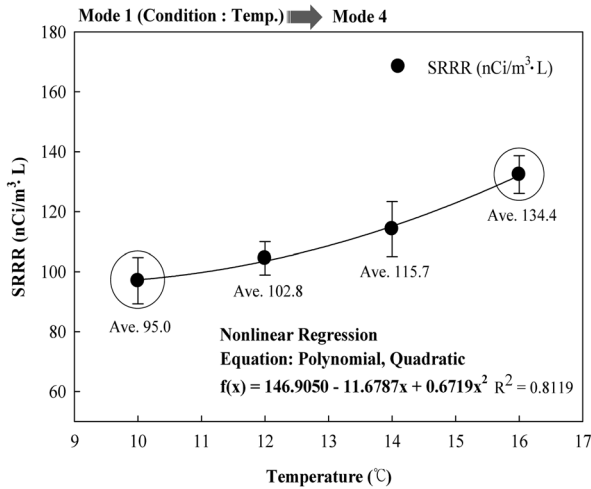


Fig. 3. The relationship between Water Temperature and SRRR.

SRRR 값을 도출하고자 하였으며 수온과 폭기량 변화에 따라 모드별 운전기간 동안 나타난 수중 라돈 제거율을 바탕으로 도출된 SRRR 값을 Table 3 및 Figs 3, 4에 나타냈다. SRRR은 단위 체적과 공기량 당 제거되는 수중 라돈 부하량으로 관계식을 아래의 식 (1)과 같이 정리하여 나타냈다.

$$SRRR = \frac{Q \times (C_0 - C)}{V \times Air_{flow}}, nCi/m^3 \cdot L \quad (InCi = 1,000 pCi) \quad (1)$$

여기서, Q = 단위시간 당 처리유량, L/min
 C_0 = 초기 수중 라돈 농도, pCi/L
 C = 반응종료 후 수중 라돈 농도, pCi/L
 V = 반응조 용량, m³
 Air_{flow} = 단위시간 당 공기주입량, L/min

수온에 따른 SRRR 값의 경우, 10, 12, 14, 16°C에서 각각 평균 95.0, 102.8, 115.7, 134.4 nCi/m³·L로 나타났다. 수온에 따른 SRRR의 회귀분석 결과 $f(x) = 146.9050 - 11.6787x + 0.6719x^2$ ($R^2 = 0.8119$) 형태의 함수로 나타났으며 이는 수온과 SRRR 값의 경우 비례적인 관계임을 나타내고 있다. 결과적으로 수온이 증가하게 되면 SRRR 값 또한 증가한다는 특성을 도출할 수 있었다.

Majreshin et al.(2012)의 수온 변화를 이용한 수중 라돈 제거 연구에서 수온을 10°C에서 60°C까지 열에너지를 가하여 승온시킬 경우, 수중 라돈은 지속적으로 감소하여 결과적으로 99% 이상 제거되는 것으로 보고하고 있으며 본 연구결과에서도 유사한 경향을 나타내고 있었다.

폭기량에 따른 SRRR 값은 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 L/

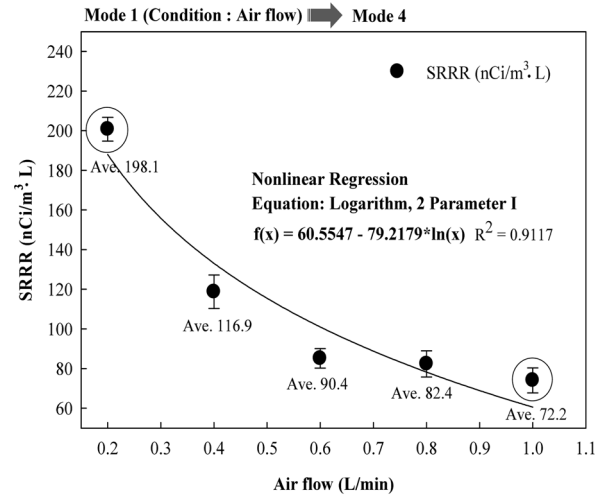


Fig. 4. The relationship between Air flow and SRRR.

min에서 각각 평균 198.1, 116.9, 90.4, 82.4, 72.2 nCi/m³·L로 나타났다. 수온에 따른 SRRR의 회귀분석 결과 $f(x) = 60.5547 - 79.2179 \times \ln(x)$ ($R^2 = 0.9117$) 형태의 함수를 나타냈다. 폭기량과 SRRR 값의 경우 수온과는 반대로 반비례적인 관계임을 나타내고 있었는데 이는 식 (1)에서의 A 값이 증가할수록 SRRR 값은 감소하는 관계식을 통하여 반비례 관계의 특성을 도출할 수 있었으며 만약 $C_0 - C$ 값이 A 값의 증가비율 대비 더 높은 비율로 증가할 경우 SRRR 값이 증가할 것으로 판단된다.

따라서 수온과 폭기량에 따른 수중 라돈 제거 효율의 상관관계를 통하여 SRRR을 수중 라돈 제거 설계 인자 사용 시 하나의 검토 인자 및 객관적으로 판단할 수 있는 지표로써 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 수온과 폭기량 변화에 따른 수중 라돈 제거 효율의 상관관계 도출을 통하여 수중 라돈 설계 인자 사용 시 SRRR 값을 간접지표로 활용할 수 있는 방안을 수립하고자 하였다. 이에 따라 수온과 폭기량과의 상관관계를 해석하였으며 동시에 SRRR 값을 도출하였다.

1) 수온과 폭기량 변화에 따른 수중 라돈 제거 효율을 토대로 도출된 SRRR 값은 2차 함수형태의 상관관계를 가지고 있으며, 수온과 폭기량 증가에 따라 수중 라돈 제거 효율 또한 증가하는 경향을 나타냈다.

2) 수온이 10°C에서 16°C로 증가할 경우 SRRR 값은 95 nCi/m³·L에서 134.4 nCi/m³·L로 증가하는 것으로 나타났으며 폭기량이 0.2 L/min에서 1 L/min으로 증가할 경우

SRRR 값은 $198.1 \text{ nCi/m}^3\cdot\text{L}$ 에서 $72.2 \text{ nCi/m}^3\cdot\text{L}$ 으로 감소하는 것으로 나타났는데 이는 공기 주입량이 증가할수록 SRRR 값은 감소하는 관계식을 통하여 반비례 관계의 특성을 보이거나 만약 C_0-C 값이 공기 주입량의 증가비율 대비 더 높은 비율로 증가할 경우 SRRR 값이 증가할 것으로 판단된다.

3) 수온에 따른 SRRR 값과의 관계를 회귀분석을 통해 $f(x) = 146.9050 - 11.6787x + 0.6719x^2$ ($R^2 = 0.8119$) 형태의 2차 함수로 나타냈으며 폭기량에 따른 SRRR 값의 경우 $f(x) = 60.5547 - 79.2179 \times \ln(x)$ ($R^2 = 0.9117$) 형태의 함수로 나타냈다. 회귀분석을 토대로 실제 수중 라돈이 미국 기준치 이상으로 검출되어지는 상수도 시설에 폭기시설을 설치할 경우, SRRR 값은 수중 라돈 제거의 설계인자로서 활용이 가능할 것으로 판단된다.

4) 본 연구는 수온과 폭기량 변화에 따른 SRRR 값의 상관관계를 도출하기 위하여 실험실 규모의 반응기를 이용하여 연구한 결과이므로 실제 라돈이 검출되어지는 상수도 시설 반영에 필요한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한 합리적인 라돈 설계인자 도출을 위해 본 연구 수행 시 설정한 수온 및 폭기량을 좀 더 세분화하여 다양한 조건에서의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업”으로 지원받은 과제임(과제번호: GT-12-B-02-014-1).

참 고 문 헌

Durrige Co., 2009, RAD7 RADON DETECTOR User Manual, 74 p.

Environmental Protection Agency, 2003, EPA Assessment of risks from radon in homes, EPA, United State of America, 88 p.

Huikuri, P., Salonen, L., and Raff, O., 1998, Removal of natural radionuclides from drinking water by point of entry reverse osmosis, *Desalination*, **119**, 235-239.

Kim, S.W., Lee, H.M., Moon, K.H., and Kim, J.S., 2010, Analysis of the spatial distribution characteristics and change of radon in soils at Busan area, *Proceedings of Petrological Society of Korea and Mineralogical Society of Korea*, Jeonju, Korea, p.119-122.

Kinner, N.E., Schell, G., Quern, P., and Lessard, C., 1988, Radon removal from drinking water using granular activated carbon, packed tower aeration and diffused bubble aeration, *AARST*, **43**, 1-14.

Majareshin, A.J., Behtash, A., and Ochbelagh, D.R., 2012, Radon concentration in hot springs of the touristic city of Sarein and methods to reduce radon in water, *Radiation Physics and Chemistry*, **81**, 749-757.

MOE (Ministry of Environment), 2011, Detection of USA standard excess radioactive materials such as radon and uranium in groundwater of domestic.

Moon, K.H., Kim, J.S., Ahn, J.K., Kim, H.C., and Lee, H.M., 2009, Long-term variation of radon in granitic residual soil at Mt. Guemjeong in Busan, Korea, *Jour. Petrol. Soc. Korea*, **18**(4), 279-291.

Schubert, M., Schmidt, A., Müller, K., and Weiss, H., 2011, Using radon-222 as indicator for the evaluation of the efficiency of groundwater remediation by in situ air sparging, *J. Environ. Radioactiv.*, **102**, 193-199.

Yu, D.H. and Han, M.H., 2002, A realistic human exposure assessment of indoor radon released from groundwater, *Korean Society of Radiology*, **27**(2), 121-126.