

연구논문

충남 지역 지하수 수질특성 연구

윤선진 · 정명상 · 송해종 · 나은경 · 김나영 · 김경아 · 권순복 · 이인숙 · 김재식[†]

충남보건환경연구원 먹는물검사팀

Study on Groundwater Quality in Chungcheongnam-do

Seonjin Yoon, Myeongsang Jeong, Haejong Song, Eunkyung Na, Nayoung Kim, Kyongah Kim, Soonbok Kwon, Insook Lee, and Jaesik Kim[†]

Drinking Water Examination Team, Chungcheongnam-do Institute of Health and Environment Reserch, Hongseong, 32254, Korea

Received December 1, 2020 / Revised December 11, 2020 / Accepted December 27, 2020

The purpose of this study was to document groundwater quality in Chungcheongnam-do. Samples were taken from Taean, Dangjin, Seocheon, Boryeong, Seosan, and Nonsan areas, and 48 water quality variables were analyzed in relation to applicable standards, including the amounts of naturally occurring radioactive materials(U and Rn). The results from testing 179 locations indicated that 128 were suitable and 51 were of unacceptable quality, in terms of drinking water quality standards. The nonconformity rate for nitrate nitrogen was 47.0%, while that for total coliforms was 24.2%. Heavy metals-such as Pb, Hg, Cd, and Cr-were detected in low concentrations at all points. Analysis of naturally occurring radioactive materials showed that U concentrations were within the water quality standard (0.03 mg/L) at all points. Rn concentrations were low in NW regions such as Taean, Dangjin, Seocheon, and Boryeong, where Proterozoic sedimentary rocks were distributed, but its concentrations in the Seosan and Nonsan areas, where granite rocks were widely distributed, required closer investigation, and it was found that the alternative maximum contaminant level (148 Bq/L) was exceeded in granite soils which originated from the Mesozoic Era.

Key words: Ground water, naturally occurring radioactive materials; radon, uranium

1. 서 론

지하수는 빗물이 땅 속으로 침투하여 생성되며, 물의 순환에 의해 저지대에서 샘물로 솟아나거나 하천, 바다로 유출되어 수문평형을 이룬다. 지하수의 수질은 기후, 토양, 암석분포, 지표수 및 육상 오염원의 유입 등에 영향을 받게 되고, 그에 따라 다양한 수질 특성을 나타내게 된다. 지하수는 연중 온도변화나 수량의 급격한 변동이 없어 안정적이고 재생가능한 자원이다. 또한 지하수가 땅속을 흐르는 동안 오염물질이 자연 정화 되고, 지층 내의 여러 물질과 반응하여 풍부한 무기물을 함유하게 된다.

2018년 기준 충청남도의 상수도 보급률은 97.1%로 전라남도(96.7%)에 이어 전국 하위권에 속한다. 상수도의 보급률은 매년 꾸준히 증가하여 전국 평균 99.2%에 이르고 있지만¹⁾, 상수도가 보급되지 않은 도내 농어촌 지역에서는 여전히 지하수를 먹는물과 생활용수로 사용하고 있는 실정이다. 농어촌 지역 지하수의 대수층은 주로 천층 지하수로, 지표수 함양에 의해 수량은 양호한 반면, 오염에 민감하고 인위적 활동에 의한 영향을 크게 받는다. 농어촌 지역에서의 지하수 오염은 주로 질산성질소(NO₃-N)와 관계가 있는데 화학비료와 유기질 비료, 가축 배설물 등 농업활동에 의한 오염이 대부분이다.

[†]To whom correspondence should be addressed.

지하수는 과도하게 사용하게 되면 고갈의 위험이 있고 수질이 악화되는 경우 정화에 오랜 시간과 비용이 요구되므로 체계적인 관리가 요구된다. 또한 지하수의 무분별한 개발은 지반침하나 해수 침투 등의 위험을 야기할 수 있다. 지하수 오염의 피해는 장기적으로 인간의 건강상 피해와 생태계 파괴를 초래하게 된다. 그러므로 지하수의 오염을 사전에 예방하는 것이 중요하며, 지속적인 모니터링을 통해 오염 여부를 파악하는 것이 필요하다. 이에 본 연구에서는 충청남도 도내 지하수를 분석하여 수질특성과 먹는물의 안정성을 파악하고자 하였다.

이와 동시에, 현재 지하수 중 미규제물질인 자연방사성물질(우라늄, 라돈)에 대한 조사를 병행하였다. 최근 지하수를 원수로 사용하는 마을상수도에서 우라늄과 라돈이 기준치 이상으로 검출됨에 따라 자연방사성물질에 대한 불안감이 높아지고 있다. 지하수 내 자연방사성물질은 물-암석 상호작용에 의해 존재하게 되는데, 이는 인위적인 오염물질인 질산성질소 등과는 구별된다.

지하수 내 우라늄은 장기간 흡입 시 만성 신장질환을 초래할 수 있고, 라돈의 경우 일정 함량 이상의 지하수를 장기간 음용할 경우 위암 발생 가능성을 높이는 것으로 알려져 있다.

1999년 대전지역 일부 지하수에서 우라늄 함량이 미국 EPA 기준치(0.03 mg/L)를 초과하였다는 보도 이후 국립환경과학원에서 전국적인 실태조사를 실시하여 왔고, 조사결과 우라늄과 라돈 함량이 지질에 따라 다르며, 화강암과 화강편마암 등의 암석에서 가장 높은 함량을 보인다는 결과를 얻었다. 충청남도는 대보화강암과 호상편마암이 대부분인 옥천지질대에 속하는 지역으로 자연방사성물질에 대한 조사 필요성이 높은 지역이다. 따라서 본 연구에서는 태안군, 당진시, 서천군, 보령시, 서산시, 논산시를 대상으로 시료를 채취하여 지하수 수질기준 항목과 자연방사성물질(우라늄, 라돈)을 분석하였다. 이를 바탕으로 환경과 지질이 수질에 미치는 영향을 분석하여 수자원 관리를 위한 과학적 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상

충청남도 도 내 태안군, 당진시, 서천군, 보령시, 서산시, 논산시 등 6개 지역을 연구지역으로 선정하여 2020년 3월부터 2020년 7월까지 총 179개 지점에서 시료를 채취하여 지하수 수질기준 46항목과 자연방사성

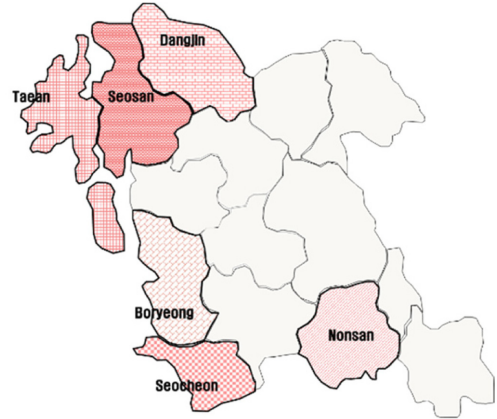


Fig. 1. Sampling sites.

물질(우라늄, 라돈)을 분석하였다. 연구지역의 지역별 시료수와 지하수 용도별 구분을 Table 1에 나타내었다.

2.2. 시험방법

2.2.1. 수질 분석 항목

수질 분석은 「먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙」에 따른 지하수 46항목과, 자연방사성물질 우라늄, 라돈을 추가하여 48항목을 분석하였다. 46항목 및 우라늄은 먹는물수질공정시험기준²⁾에 따라, 라돈은 「먹는물 수질 감시항목 운영 등에 관한 고시」³⁾별표 3에 따

Table 1. Investigated groundwater classification based on use

Region	No. investigated.	Total	179
Taean	29	Drinking	21
		Living	6
		Agricultural	2
Dangjin	33	Drinking	30
		Living	1
		Agricultural	2
Seocheon	26	Drinking	10
		Living	10
		Agricultural	6
Boryeong	33	Drinking	30
		Agricultural	3
Seosan	25	Drinking	6
		Living	5
		Agricultural	14
Nonsan	33	Drinking	31
		Living	1
		Agricultural	1

Table 2. Analysis instrumentation operating parameters

ICP / MS (PerkinElmer NexION 300D)		Ion Chromatography (Dionex Integriion RFIC)	
Variable	Operating conditions	Variable	Operating conditions
Plasma gas(Ar) flow rate	18.0 L/min	Column	Ionpac AS 18 4 × 250 mm
ICP RF Power	1.4 kW	Detector	Conductivity detector
Auxiliary gas(Ar) Flow rate	1.2 mL/min	Suppressor	ADRS 600 4 mm
Nebulizer gas(Ar) Flow rate	0.93 L/min	Flow rate	1.0 mL/min
LSC (HIDEX 300)		GC (Agilent 7890A)	
Variable	Operating conditions	Variable	Operating conditions
Counting times	3600 sec.	Carrier gas(N2) flow rate	1.0 L/min
Activity Type	Alpha	Column	CP selected 624CB (60 m × 0.25 ID mm × 1.4 μm)
Coincidence Times	35 ns	Detector	FID
ROI isotope	Free	Oven Temp.	40°C(2min)-4°C/min-100°C (2min)-12°C/min-225°C(2min)
ROI window	650~950	Injection Temp.	230°C

Table 3. Groundwater analysis results

Region	Investigated No.	Noncom plian	Noncomp -liance rates (%)	Nonconforming items
Total	179	51	28.5	
Taeon	29	8	27.6	Total coliforms (6), Fecal coliforms (4), Nitrate nitrogen (2), Arsenic (2), Total Colony Counts (1), Fluoride (1)
Dangjin	33	9	27.3	Nitrate nitrogen (6), Total coliforms (3), Total Colony Counts (1), Turbidity (1)
Seocheon	26	2	7.7	Nitrate nitrogen (2)
Boryeong	33	13	39.4	Nitrate nitrogen (5), Total coliforms (5), Turbidity (2), Chloride (2)
Seosan	25	13	52.0	Nitrate nitrogen (11), Total coliforms (1), Total Colony Counts (1), Turbidity (1), Chloride (1)
Nonsan	33	6	18.2	Nitrate nitrogen (5), Total Colony Counts (2), Total coliforms (1),

라 조사하였다.

2.2.2. 분석 조건

중금속은 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP/MS), 이온물질은 이온크로마토그래피(IC), 라돈은 액체섬광계수기(LSC)를 이용해 분석하였고, 휘발성유기화합물은 가스크로마토그래피(GC)를 이용하여 분석하였다. 본 연구에 이용한 장비의 분석 조건은 Table 2와 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 지하수 수질기준 항목

지하수의 오염은 그 지역의 지질 특성, 지하수공의

깊이, 지하수 사용량, 주변 오염원의 유입 등 다양한 잠재적 요인에 의해 발생한다. 우리나라의 지하수 오염의 유형을 살펴보면 일반세균, 총대장균군 등 미생물에 의한 오염이 가장 높고, 그 다음으로 질산성질소, 탁도에 의한 오염이 많은 비중을 차지한다.⁴⁾ 본 연구에서도 지하수의 일반적 오염과 유사한 결과를 보였다.

Fig. 2에서와 같이 연구지역 179 지점 중 128 지점(71.5%)이 수질기준에 적합하였고 먹는물 수질기준을 초과한 지점은 51지점(28.5%)으로 조사되었다. 수질 부적합 항목은 질산성질소(47.0%), 총대장균군(24.2%), 일반세균(7.6%), 분원성대장균군(6.1%), 탁도(6.1%) 순으로 높았다.

6개 지역별 지하수의 조사결과를 살펴 보면 태안군은

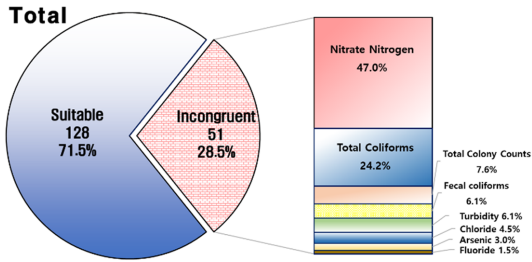


Fig. 2. Distribution of Water Quality Standard noncompliances.

29지점 중 8지점에서 수질기준을 초과하여 부적합율이 27.3%로 나타났다. 총대장균군과 분원성대장균군, 일반세균 등 미생물 항목에서 부적합율(68.8%)이 높게 나타났고, 2지점에서 비소가 각각 0.024 mg/L, 0.025 mg/L 검출되어 수질기준(0.01 mg/L)를 초과하였다. 당진시는 33지점 중 9지점에서 수질기준을 초과하였다. 질산성질소 부적합이 54.5%로 나타났고 전체적으로 부적합율이 27.3%로 조사되었다. 서천군은 연구지역 중 가장 부적합율이 낮은 지역으로(7.7%) 26지점 중 2지점에서 질산성질소가 기준을 초과하였다. 보령시의 경우 33지점 중 13지점에서 수질기준을 초과하여 39.4%의 부적합율

을 보였고 그 중 질산성질소, 총대장균군 부적합이 각각 14.1%로 가장 높았다. 서산지역은 25지점 중 13지점에서 수질기준을 초과하여 부적합율이 52.0%에 이르렀고 그 중 질산성질소 부적합이 73.3%로 나타났다. 논산시는 33지점 중 6지점에서 수질기준을 초과하여 부적합율이 18.2%였다. 서천군과 논산시는 다른 지역에 비해 상대적으로 수질이 양호한 편으로 조사되었다.

지역별로 차이는 있지만 질산성질소에 의한 부적합이 대부분을 차지하였다. 특히 조사대상 6개 시군 중 가장 부적합율이 높은 서산 지역(52.0%)은 질산성질소 부적합율이 73.3%로 나타나, 지하수 주변 환경으로부터의 인위적인 오염원 관리가 시급히 요구된다(Fig. 3).

주요 오염물질인 질산성질소는 단백질과 같은 질소 화합물이 산화분해되는 과정에서 생성되는 최종 산물로, 토양에서의 배출은 거의 없고 인간활동에 기인하기 때문에 지하수 중 유기물 오염의 대표적인 지표이다. 본 연구에서 질산성질소의 농도 범위는 불검출~72.0 mg/L에 이르고, 최고농도는 서산 지역에서 검출되었다. 지역별 평균농도는 태안군 3.2 mg/L, 당진시 5.9 mg/L, 서천군 8.7 mg/L, 보령시 6.2 mg/L, 서산시 20.3 mg/L,



Fig. 3. Regional noncompliance rates (%) and nonconforming items.

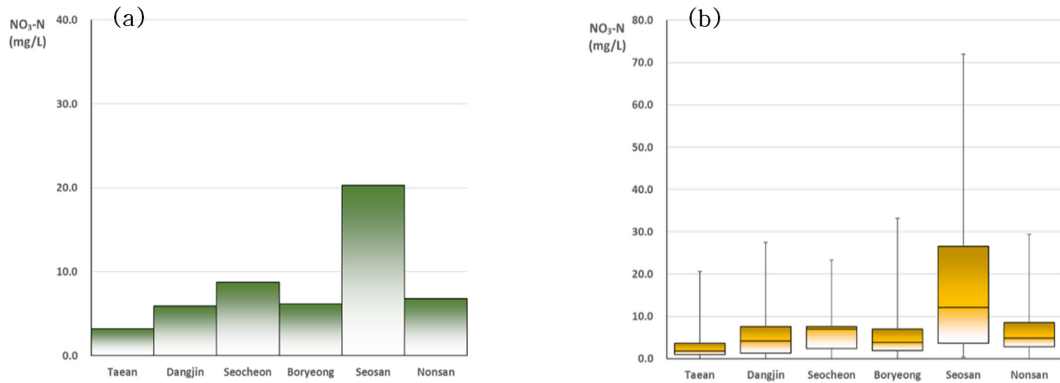


Fig. 4. NO₃-N in regional areas: (a) average concentrations; (b) box plots.

논산시 6.8 mg/L이고, 중앙값은 태안군 1.8 mg/L, 당진시 4.1 mg/L, 서천군 7.0 mg/L, 보령시 3.8 mg/L, 서산시 12.1 mg/L, 논산시 4.9 mg/L로 조사되었다.

서산 지역은 대부분의 가구가 상수도를 음용수로 사용 중이며, Table 1에서 보는 바와 같이 조사 전체 시료 중 농업용수가 56%를 점하고 있는데 지하수를 음용 목적으로 개발한 경우에도 실제로는 생활용수나 농

업용수로 사용 중이고 축사와 농경지가 지하수공 인근에 위치하고 있어 그로부터 유입된 오염물질로 인해 수질기준을 초과한 것으로 판단된다.

Fig. 4는 지역별 질산성질소의 평균값(a)과 Box plot(b)을 나타낸 것이다.

중금속 분석결과, 납, 수은, 카드뮴, 크롬은 연구지역 전 지점에서 검출되지 않았다. 각 중금속 함량 분포는

Table 4. Study area heavy metal concentrations.

(Unit: mg/L)

Region	Value	Pb	Hg	Cd	Cr	As	Cu	Zn	Fe	Mn	Al
Total	Min.	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Max.	ND	ND	ND	ND	0.025	0.125	1.309	0.17	1.336	0.19
	Avg.	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.066	ND	0.029	ND
	Median	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.017	ND	ND	ND
Taean	Min.	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Max.	ND	ND	ND	ND	0.025	0.028	1.281	0.17	0.062	0.15
	Avg.	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.115	ND	0.006	ND
Dangjin	Min.	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Max.	ND	ND	ND	ND	ND	0.019	0.078	0.15	0.171	0.08
	Avg.	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.019	ND	0.009	ND
Seocheon	Min.	ND	ND	ND	ND	ND	0.000	0.003	ND	ND	ND
	Max.	ND	ND	ND	ND	0.009	0.125	0.363	0.11	1.263	0.17
	Avg.	ND	ND	ND	ND	ND	0.009	0.086	ND	0.051	ND
Boryeong	Min.	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Max.	ND	ND	ND	ND	0.008	0.070	1.309	0.11	0.116	0.19
	Avg.	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.114	ND	0.007	ND
Seosan	Min.	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Max.	ND	ND	ND	ND	0.009	0.015	0.487	0.07	1.336	0.03
	Avg.	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.047	ND	0.082	ND
Nonsan	Min.	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Max.	ND	ND	ND	ND	ND	0.012	0.045	0.15	0.837	ND
	Avg.	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.017	ND	0.033	ND

ND : Not detected.

Table 5. Groundwater analyte correlation coefficients (r) for this study

	Color	Turbidity	F ⁻	NO ₃ -N	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Hardness	pH	KMnO ₄ consumed	Cu	Zn	Fe	Mn	Al	As
Color	1.00														
Turbidity	0.15	1.00													
F ⁻	-0.03	-0.05	1.00												
NO ₃ -N	0.09	-0.03	-0.11	1.00											
Cl ⁻	0.03	0.06	-0.06	0.14	1.00										
SO ₄ ²⁻	0.20	0.03	-0.01	0.05	0.49	1.00									
Hardness	0.11	-0.03	-0.08	0.37	0.74	0.43	1.00								
pH	0.00	-0.06	0.16	-0.32	-0.17	-0.17	-0.09	1.00							
KMnO ₄	0.06	0.61	-0.04	-0.01	0.18	0.21	0.09	-0.12	1.00						
Cu	0.01	0.03	-0.03	0.11	0.05	0.29	-0.04	-0.20	0.04	1.00					
Zn	0.12	0.03	-0.06	0.00	0.00	0.04	-0.03	-0.02	0.00	0.14	1.00				
Fe	0.23	0.75	-0.03	-0.08	0.08	0.09	0.03	0.04	0.32	0.01	0.06	1.00			
Mn	-0.01	0.29	-0.03	-0.06	-0.02	0.03	-0.03	-0.14	0.35	-0.03	-0.04	0.26	1.00		
Al	0.38	0.19	0.07	-0.02	0.04	0.02	0.00	0.14	-0.04	-0.04	0.01	0.42	0.00	1.00	
As	-0.02	-0.04	0.11	-0.12	0.15	0.03	0.03	0.24	0.00	-0.04	-0.04	0.05	-0.03	0.26	1.00

비소 불검출~0.025 mg/L, 구리 불검출~0.125 mg/L, 아연 불검출~1.309 mg/L, 철 불검출~0.17 mg/L, 망간 불검출~1.336 mg/L, 알루미늄 불검출~0.19 mg/L로 분석되었다. 태안군 일부 지역에서 비소 농도가 0.024~0.025 mg/L로 수질기준을 초과 하였고, 서천군과 서산시 일부 지역에서 망간이 1.263~1.336 mg/L 검출되었으나 각각 생활용수, 농업용수로 먹는물 수질 검사항목에 해당되지 않아 수질기준 부적합을 산정에 포함시키지 않았다. 구리, 아연 및 망간을 제외한 다른 중금속의 평균농도가 정량한계 미만으로 분석되어, 전체적으로 중금속 함량은 낮았다(Table 4).

Table 5는 Pearson 상관계수(r)를 사용하여 분석항목 간 상관성을 조사한 결과이다. Pearson 상관계수는 두 변수 사이의 선형관계로 비례적 연관성을 평가하는 것으로, 분석항목간 양의 상관성이 클수록 +1에, 음의 상관성이 클수록 -1에 가까운 수치를 나타낸다. 탁도와 철($r=0.75$), 염소이온과 경도($r=0.74$)는 양의 상관성이 높았고, 탁도와 KMnO₄소비량 간의 상관계수(r)는 0.61로 보통의 상관성을 갖는다. Al은 Fe과 비교적 낮은 상관관계를 보였으며($r=0.42$) 질산성질소와 염소이온 간의 상관계수는 0.14로 상관성이 없는 것으로 조사되었다.

3.2. 자연방사성물질 함량

자연방사성 물질이란 지구의 지각에 존재하는 방사

성물질로, 대표적으로 우라늄(²³⁸U), 라듐(²²⁶Ra, ²²⁴Ra), 라돈(²²²Rn, ²²⁰Rn) 등을 들 수 있다. 이들의 반감기는 우라늄 45억년, 라듐 1,600년, 라돈 3.82일이다. 암석이나 토양 등에 있는 우라늄(²³⁸U)과 토륨(²³²Th)이 붕괴하면서 자연적으로 라듐(²²⁶Ra, ²²⁴Ra)이 만들어지고 라듐이 붕괴하면서 라돈(²²²Rn, ²²⁰Rn)과 같은 방사성 물질을 만든다. 토륨(²³²Th)이 붕괴하면서 만들어지는 라돈(²²⁰Rn)을 일반적으로 ‘토론’이라고 하는데, 반감기가 55.6초로 매우 짧고, 우라늄(²³⁸U)이 붕괴하면서 생기는 라돈(²²²Rn)에 비해 양이 매우 적어, 흔히 ‘라돈’이라고 하면 라돈(²²²Rn)을 말한다.⁵⁾

지하수 중 자연방사성물질은 지질과 밀접하게 연관되어 있는데, 국내외 연구 결과 중생대 쥐라기 화강암, 선캄브리아기 변성암 지대에서 자연방사성 물질 함량이 높은 것으로 알려져 있다.⁶⁾

우리나라 지하수 중 자연방사성물질 조사 결과 우라늄의 농도범위는 ND~0.527 mg/L, 중앙값 0.001 mg/L이며, 라돈의 농도범위는 0.46~942 Bq/L, 중앙값 100 Bq/L로 보고되고 있다. 우라늄의 먹는물 수질기준 초과율은 3.3%, 라돈 초과율(미국 EPA 먹는물 권고치 기준)은 25.0%로 나타났다.⁶⁾

연구지역의 지질분포는 화강암과 퇴적암, 변성암이 각각 45지점(25%), 60지점(34%), 74지점(41%)을 이루고 있다. 암석의 시대별 분포를 보면 선캄브리아대에서 신생대에 이르고, 중생대 쥐라기 화강암류[흑운모화강

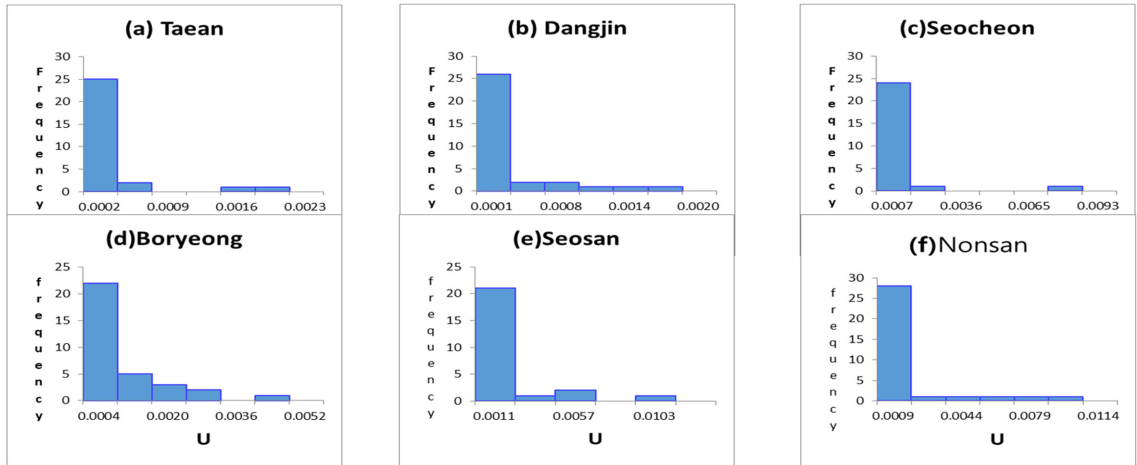


Fig. 7. Study area U concentration distribution.

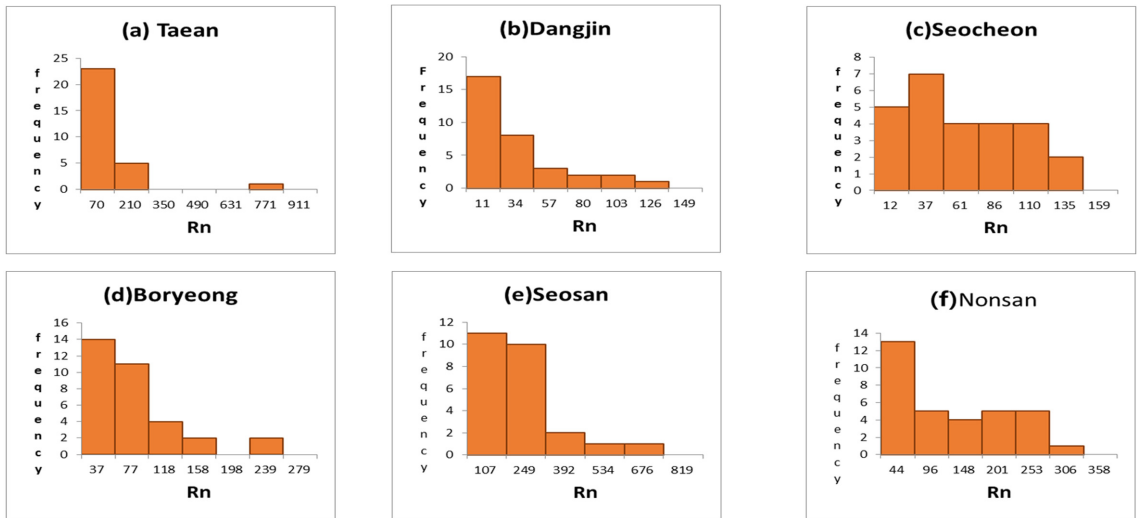


Fig. 8. Study area Rn concentration distribution.

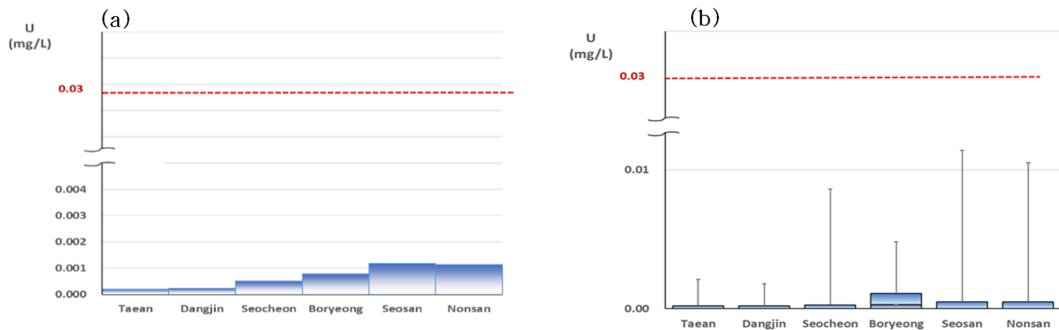


Fig. 9. U regional distribution: (a) average concentrations; (b) box plots.

지하수 내 자연방사성물질의 분포는 일차적으로 지질과 물, 암석의 지화학적 반응에 의해 결정된다. 특히

라돈은 지하수 내에서 멀리 이동하지 않고 주변의 지질조건에 의한 영향을 직접적으로 받는다. 2007년부터

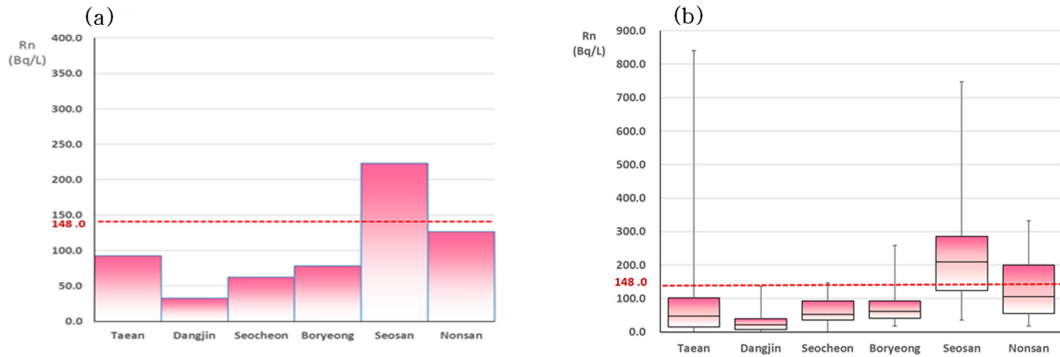


Fig. 10. Rn regional distribution: (a) average concentrations; (b) box plots.

Table 7. U and Rn concentration statistics in relation to geological classification

Main Rocks	No.	U (mg/L)				Rn (Bq/L)			
		Min.	Max.	Avg.	Median	Min.	Max.	Avg.	Median
Total	179	ND	0.0114	0.0007	ND	ND	840.6	99.0	64.8
Qa	37	ND	0.0105	0.0011	0.0002	ND	131.9	66.6	69.1
Jbgr	23	ND	0.0114	0.0013	ND	35.8	747.3	233.8	210.5
PCEe	17	ND	0.0015	0.0001	ND	ND	840.6	94.3	32.4
Csch	12	ND	0.0011	0.0002	ND	ND	136.8	32.4	17.7
PCEss	10	ND	0.0005	0.0001	ND	3.4	74.1	34.6	29.7
Jbgd	11	ND	0.0043	0.0008	ND	55.1	331.5	199.0	211.1
PCEgn	11	ND	0.0006	0.0001	ND	9.9	204.9	101.2	91.2
Jpgdi	7	ND	0.0014	0.0002	ND	32.8	247.6	143.0	170.4
PCEms	10	ND	0.0011	0.0004	0.0003	34.1	236.4	73.1	58.0
Jms	11	ND	0.0086	0.0010	ND	12.0	146.5	66.6	61.2
Jha	4	ND	0.0022	0.0008	0.0006	20.1	151.1	75.8	66.1
Jgdi	2	ND	ND	ND	ND	27.6	122.2	74.9	74.9
Jga	6	ND	0.0032	0.0011	ND	17.0	258.7	98.3	57.9
n	6	ND	0.0002	ND	ND	ND	96.4	30.3	22.4
Etc.	12	-	-	-	-	-	-	-	-

ND : Not detected

국립환경과학원과 지질자원연구원에서 전국의 마을상수도를 대상으로 지하수 내 자연방사성물질의 함량분포를 조사한 결과를 살펴보면 자연방사성물질의 함량은 암석에 따라 큰 차이를 보이는 데 화강암, 변성암, 퇴적암, 화산암의 순으로 우리나라 라돈의 함량이 높았다.⁶⁾ 실제로 중생대 화강암이 많이 분포하는 경기, 충북, 전북, 충남 지역의 지하수에서 다른 지역에 비해 높은 우리나라 라돈 함량을 보였다는 연구결과가 발표된 바 있다.⁹⁾

연구지역 지하수의 지질별 자연방사성물질 특성을 파악하기 위하여 179개 지하수 시료를 지질에 따라 분류하고 우리나라 라돈의 함량 분포를 조사하였다(Table 7).

우리나라 최고농도는 흑운모화강암(Jbgr) 지역에서 검출되었으나 지질별 차이는 거의 없었다. 라돈의 최고농

도는 흑운모편암(PCEe) 지역에서 검출되었다. 라돈의 지질별 함량 분포는 화강암 계열인 흑운모화강암(Jbgr) 지역에서 평균농도 233.8 Bq/L, 중앙값 210.5 Bq/L, 흑운모화강섬록암(Jbgd) 지역에서 평균농도 199.0 Bq/L, 중앙값 211.1 Bq/L, 반상화강섬록암(Jpgdi) 지역의 경우 평균농도 143.0 Bq/L, 중앙값 170.4 Bq/L로 조사되었다.

변성암인 화강편마암(PCEgn) 지역은 평균농도 101.2 Bq/L, 중앙값 91.2 Bq/L이었으며, 퇴적암인 패암-사암(Jga) 지역에서는 평균농도 98.3 Bq/L, 중앙값 57.9 Bq/L로 화강암 계열이 변성암, 퇴적암 계열에 비해 높은 라돈함량을 나타내었다. Fig. 11은 우리나라의 지질별 평균농도와 함량분포를, Fig. 12는 라돈의 평균농도와 함량분포를 나타낸 것으로 우리나라의 먹는물 수질기준과

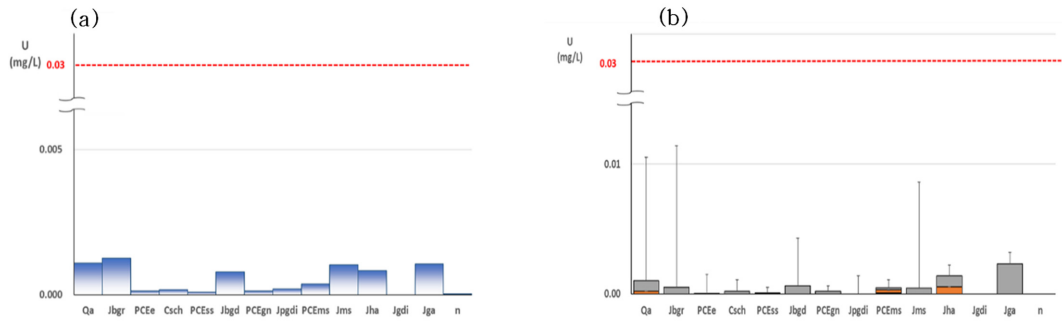


Fig. 11. U concentrations in relation to geological layers: (a) average concentrations; (b) box plots.

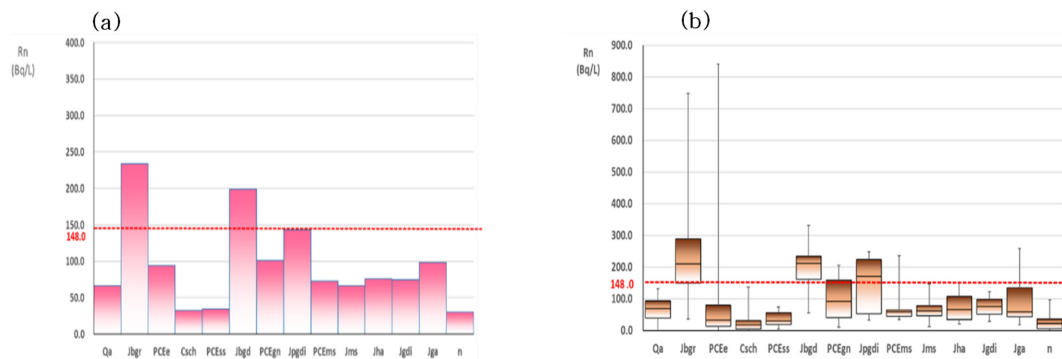


Fig. 12. Rn concentrations in relation to geological layers: (a) average concentrations; (b) box plots.

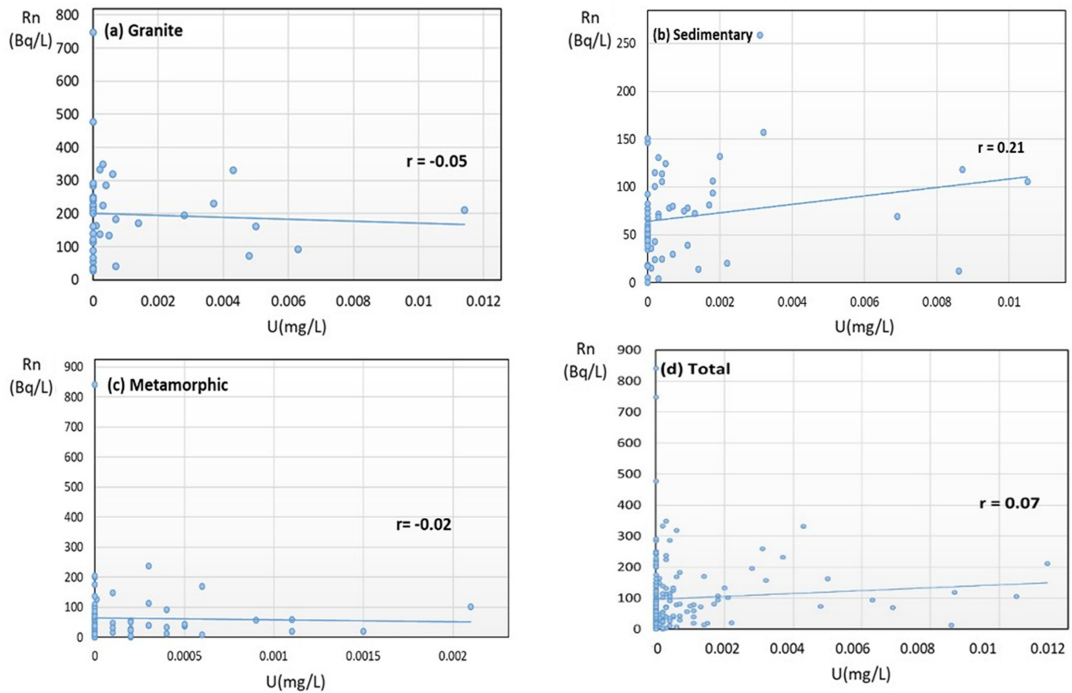


Fig. 13. Correlation coefficients between U and Rn and various geological layers.

라돈의 감시항목 수질기준을 붉은 점선으로 표시하였다.

지질별 우라늄과 라돈의 상관성을 파악하기 위해 연구 대상지역을 크게 화강암(Jbgr, Jbgd, Jpgdi, Jgdi, n=45), 퇴적암(Qa, Jms, Jha, Jga, n=60), 변성암(PCEe, CsCh, PCEss, PCEgn, PCEms, n, n=74)으로 분류하고, Pearson 상관계수를 이용해 두 성분간의 상관관계를 분석한 결과(Fig. 13), 화강암 지질에서 $r=-0.05$ (Fig. 13(a)), 퇴적암 지질에서 $r=0.21$ (Fig. 13(b)), 변성암 지질에서 $r=-0.02$ (Fig. 13(c))이었고 모든 지질에서 $r=0.07$ (Fig. 13(d))로 분석되어 어느 지질에서든 우라늄과 라돈의 상관성은 없는 것으로 조사되었다. 라돈은 우라늄의 붕괴과정에서 자연발생하는 물질로 우라늄과의 상관성이 높을 것으로 예상되었으나, 반감기가 3.82일로 매우 짧고 휘발성이 강한 라돈 특성상 시료채취 과정이나 분석시간 동안 소실되어 상관성을 보이지 않는 것으로 판단 된다.

4. 결 론

충청남도 태안군, 당진시, 서천군, 보령시, 서산시, 논산시를 대상으로 지하수 수질기준 항목과 자연방사성 물질(우라늄, 라돈) 분포를 조사한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 6개 시군 179지점의 지하수 수질 조사 결과, 51지점(28.5%)에서 먹는물 수질기준을 초과하였다. 항목별 부적합율은 질산성질소(47%), 총대장균군(24.2%), 일반세균(7.6%), 분원성대장균군(6.1%), 탁도(6.1%) 순으로 높았다. 특히 질산성질소는 연구지역에서 가장 높은 부적합율을 보였는데 이는 자연에서 배출 되지 않는 인위적 오염의 지표로 생활하수 및 분뇨, 축산폐수, 유기질 비료 등 인간활동 기인한 것으로 판단된다. 따라서 지하수공 주변의 수질 오염원 관리가 시급하다 하겠다. 총대장균군과 일반세균이 부적합한 지하수는 주변시설의 관리 소홀로 인한 오염이 대부분으로 음용수로 사용할 경우 주변을 청결히 하고 소독을 철저히 하는 등 지속적인 관리가 요구된다.

2. 지하수의 지역별 자연방사성물질 함량 분포 조사 결과 태안지역에서 우라늄 ND~0.0021 mg/L, 라돈 ND~840.6 Bq/L, 당진지역에서 우라늄 ND~0.0018 mg/L, 라돈 ND~136.8 Bq/L, 서천지역에서 우라늄 ND~0.0086 mg/L, 라돈 ND~146.5 Bq/L, 보령지역에서 우라늄 ND~0.0048 mg/L, 라돈 ND~258.7 Bq/L, 서산지역에서 우라늄 ND~0.0114 mg/L, 라돈 ND~747.3 Bq/L, 논산지역에서 우라늄 ND~0.0105 mg/L, 라돈 ND~331.5 Bq/L

으로 조사되었다. 우라늄은 대부분 0.01 mg/L 이하이었으나 라돈은 21.2%가 감시항목 수질기준을 초과하였다. 중생대 화강암과 선캄브리아기 편마암이 주로 분포하는 서산지역과 논산지역에서 상대적으로 높은 라돈 함량을 나타내었다. 라돈은 우라늄에 비해 지역적 편차가 컸으나 전국에 비해 낮은 수준이었다.

우라늄과 라돈의 지질별 상관성 조사결과, 화강암, 퇴적암, 변성암 등 모든 지질에서 낮은 상관계수를 보여 두 성분간 상관성은 확인되지 않았다.

3. 충청남도는 지질 분포 특성상 화강암과 변성암 지대가 넓게 분포되어 있어 자연방사성물질에 대한 조사가 시급한 지역이다. 지질별로 우라늄과 라돈 함량 분포가 다양하기 때문에 중장기적인 연구와 관리방안을 마련해야 한다. 향후 모암의 종류와 지하수 관정의 심도별 함량 조사, 충남 도내 다른 지역에 대한 대한 심층 연구가 추가적으로 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 국립환경과학원의 시도보건환경연구원 국고보조사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. KOSIS 국가통계포털(<https://kosis.kr/index/index.do>), 2020년 12월.
2. 국립환경과학원, 먹는물수질공정시험기준, 2018.
3. 환경부, 먹는물 수질감시항목 운영 등에 관한 고시, 2019.
4. H. G. Park and J. Y. Park, "Study on Water Quality Management of Drinking Groundwater and Its Regional Characteristics in the West Gyeong-Nam", *Journal of Korean Society on Water Environment*, 2015, Vol. 31(2), 103-109.
5. 환경부, 생활 속 자연 방사성 물질, 라돈의 이해, 2016.
6. 환경부·국립환경과학원, 지하수 중 자연방사성물질 함유 실태 조사연구, 2018.
7. 한국지질자원연구원 지질정보서비스시스템(<https://mgeo.kigam.re.kr>), 2020년 10월.
8. D. H. Jeong, M. S. Kim, B. K. Ju, and T. S. Kim, "Distribution Characteristics of Uranium and Radon Concentration in Groundwaters of Provinces in Korea", *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 2011, Vol.16(6), 143-149.
9. D. H. Jeong, "Characteristics of Hydrogeochemistry and Natural Occurring Radioactive material in Groundwater according to Rock Distribution in Korea", Department of Geology Graduate School, Dissertation, Daegu, Kyungpook National University, 2019.