

## 경북 북부지역 라돈<sup>(222)</sup>, 우라늄<sup>(238)</sup>, 토륨<sup>(232)</sup> 분포 특성

이해근 · 이상민 · 박상수 · 김자현 · 이효동 · 나채근

북부지원 먹는물검사과

Distribution of Ra<sup>(222)</sup>, U<sup>(238)</sup>, Th<sup>(232)</sup> in Northern area of Gyeong-Buk

H. G. Lee, S. M. Lee, S. S. Park, J. H. Kim, H. D. Lee and C. G. Na

**Drinking Water Analysis Division, Northern Branch**

### Abstract

Most radioactive materials in Korea are naturally generated, and radioactive materials present in the crust are naturally eluted. Recently, high concentrations of radioactive materials were detected in some areas using groundwater, and no management measures were proposed in Korea compared to other countries. This study evaluated the degree of contamination by comparing the results of measurements of Radon, Uranium, and Thorium to domestic and foreign water quality standards to prevent radioactive damage to local residents. The number of samples that exceeded the recommended standards in the U.S. and South Korea exceeded 6.38% for Radon and 4.97% for Uranium. Areas formed by Granite Terrain showed samples exceeding environmental standards compared to other regions. The area can be affected by radioactive materials such as Radon and Uranium, and measures are needed to provide safe drinking water to local residents.

**Key Words** : radioactive materials, Radon, Uranium, Thorium, Granite Terrain

### 1. 서 론

방사성 물질은 자연적 오염원과 인위적인 오염에 의해 오염된다. 인위적인 오염은 산업 활동에 의해 발생되며, 자연적 오염원은 지각에 존재하는 방사성 물질이 풍화, 침식 등에 의해 자연적으로 용출 되는 현상을 말한다. 우리나라 대부분의 경우 자연적으로 발생된다.<sup>5)</sup>

핵연료로 사용되고 있는 우라늄은 자연계에 존재하는 원자 중 가장 무거운 원소이다. 자연계에서 3 개의 동위원소로 이루어져 있으며, <sup>238</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>234</sup>U 중에 <sup>238</sup>U이 99.3%로 가장 많이 차지하고 있다. 이들 모두 방사선을 방출하며, 화학적 독성을 가지고 있다. 우라늄의 농도가 높을 경우 신장 장애를 초래 한다고 보고되었다.<sup>8)</sup>

우라늄과 마찬가지로 핵연료로 사용될 수 있는 토륨은 우라늄보다 3~4배 많은 양이 지구에 매장되어 있으며, 우라늄에 비해 방사능 방출이 약해 안전할 수 있으나 이산화토륨에서 생산된 토로트래스트(Thorotrast: ThO<sub>2</sub> 콜로이드 용액)를 사용한 지역은 다양한 종양이 발생 되었다고 보고 되었다.<sup>10)</sup>

라돈은 우라늄과 토륨이 자연 붕괴로 의해 발생되며 자연에 대부분 존재하는 라돈은 <sup>222</sup>Rn이다. 반감기는 3.8 일로 짧으나 무색무취의 불활성 기체이므로 휘발성이 강하다. 인체에 라돈이 흡입될 경우 폐암에 주요 원인이 된다.

우리나라는 다른 나라에 비해 지하수를 식수원으로 이용이 적으나 대부분 농촌 지역의 경우 마을상수도 및 지하수 이용률은 높다. 이러한 상수 시설들은 대규모 상수시설에 비해 수질 관리가

용이하지 않으며, 최근 지하수를 이용하는 일부 지역에서 고농도에 방사성 물질이 검출되어 문제가 제기 되고 있다. 이러한 고농도에 방사성 물질은 앞에서 언급했듯이 자연적으로 용출 되어 발생된 것이며<sup>2)</sup>, 다른 나라에 비해 우리나라는 방사성 물질에 대한 관리 방안이 제시되지 않았다.

본 연구는 경상북부 지역의 지하수 및 민방위 비상급수 대상으로 지역주민의 방사능 피해방지를 위해 우라늄, 라돈, 토륨 농도 측정결과를 국내외 수질 기준과 비교하여 지질적 특성 및 행정적 구역으로 나누어 고찰하였으며 지역주민에게 안전한 먹는 물 공급을 위한 기초자료로 활용하고자한다.

### 2. 재료 및 방법

#### 2.1. 라돈(액체섬광계수법 <sup>222</sup>Rn)

##### 1) 분석장비

라돈은 먹는물 수질감시항목 운영지침 및 시험방법에 따라 액체섬광계수기, Hidex Oy, FI/300SL 분석 장비와 각테일용액(HIDEX MaxiLight)을 사용하였으며, 시험기준은 먹는물, 샘물 및 염지하수 중에 라돈을 측정하는데 적용한다. 이 시험방법에 의한 라돈의 정량한계는 2.0 Bq/L이다.

##### 2) 간섭물질

먹는 물 혹은 각테일 용액 내에 우라늄, 라듐 등 다른 방사성물질이 존재할 때 측정값을 증가시킬 수 있다. 보정된 표준물질에 비해 시료의 성상이 크게 다를 경우 측정효율의 차이가 발생할

수 있다. 물 시료와 각테일 용액이 혼합된 시료는 햇빛에 의해 인공적 들뜸현상이 발생하여 측정값을 증가시킬 수 있기 때문에 암소에서 보관해야 한다.

### 3) 표준용액

라돈은 표준용액이 없어 모핵종인 라듐(<sup>226</sup>Ra) 표준용액을 사용한다. 라듐(<sup>226</sup>Ra) 액상표준물질은 한국표준과학연구원 혹은 해외 NIST (National Institute of Standards and Technology) 등에서 구입할 수 있다.

### 4) 각테일 용액

섬광용액이라고도 부르며 방사성 붕괴 시 에너지를 흡수할 때 빛을 내는 3가지 화학 물질(용매, 유화제, 형광제)의 혼합물이다. 제조 초기 각테일 용액의 성분은 벤젠, 톨루엔, 자일렌과 같은 용매를 사용하였으나 최근에는 DIPN(Diisopropyl-naphthalene), PXE(phenylxylylethane), LAB(linear alkyl benzene)과 같이 상대적으로 독성이 낮은 용매를 이용한 제품이 많이 생산된다.

### 5) 효율값 측정(Calibration)

효율값(efficiency value)은 라듐(<sup>226</sup>Ra) 표준용액을 일정한 농도로 조제하여 각테일용액과 혼합한 후 라듐(<sup>226</sup>Ra) 및 딸핵종(자핵종)을 영속평형 시킨 후 측정값을 조제한 농도값으로 나눈 비로 산정한다.

- 20 mL 바이알에 각테일 용액 12 mL를 담는다.
- 표준물질의 원액은 정제수를 이용하여 일정농도로 희석한다.
- 피펫을 이용하여 표준물질 8 mL를 바이알에 주입하고 뚜껑을 닫은 후 각테일 용액과 표준

물질이 충분히 혼합되도록 30회 이상 흔든다.

- 바이알은 암소에서 약 30일간 보관하는데 이 기간 동안 <sup>226</sup>Ra과 딸핵종(자핵종) 라돈, <sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Po가 영속평형 된다.
- 영속평형된 시료는 최적의 조건에서 액체섬광계수기로 60 분 동안 α 계수 값을 측정한다. 분석시간은 충분히 길게 주는 것이 좋으나 너무 단시간의 측정은 불확실성 값을 높일 수 있다.

### 6) 측정법

- 시료채취 과정으로 바이알에 채취한 시료는 3 시간 동안 암소에서 보관하는 과정에서 라돈과 딸핵종(자핵종) <sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Po가 영속평형 된다.
- 영속평형 된 시료는 기기별 최적의 조건에서 액체섬광계수기로 60분간 분석한다. 분석시간은 충분히 길게 주는 것이 좋으나 너무 단시간의 측정은 불확실성 값을 높일 수 있다.
- 측정된 결과값은 계산식이 내장된 소프트웨어를 이용하거나 직접 엑셀에 입력하여 결과를 산출한다.

### 7) 결과보고

측정결과는 Bq/L 또는 pCi/L 등 방사성농도 단위로 표시될 수 있으나 최종 결과는 국제표준 단위인 Bq/L로 표기한다.

## 2.2. 라돈 시료채취 및 관리

- 1) 20 mL 폴리에틸렌 또는 유리 바이알을 준비한다. 현장에서 시료채취 시 유리 바이알은 파손의 위험이 있어 플라스틱 재질의 바이알을 추천하며 내벽과 뚜껑이 PTFE로 코팅된 제품의 사용을 추천한다.

## I. 연구사업

- 2) 실험실에서 바이알에 각테일 용액 12 mL를 담는다.
- 3) 각테일 용액이 담긴 바이알을 현장으로 가져간다.
- 4) 플라스틱 재질의 비커를 준비한다. 대표 샘플 채취를 위해 수도꼭지의 물을 틀고 약 2 분간 물을 흐르게 하여 정류상태로 안정화 시킨다. 물의 유속을 줄이고 비커를 흐르는 물에 최대한 가까이 붙인 후 비커를 비스듬히 기울여 기포가 발생하지 않도록 한다. 수도꼭지에서 물 시료가 분산되어 나오는 형태나 미세하고 강하게 나오는 형태의 경우 호스나 튜브를 이용하여 유속을 낮춘다.
- 5) 계속적으로 흐르게 한 상태에서 피펫을 사용하여 기포가 없는 샘플을 2 회 채취하고 버린 후 피펫 끝 부분이 물 표면에서 약 3 cm 아래부분에 위치되도록 하고 8 mL를 회수한다.
- 6) 각테일 용액이 들어있는 바이알의 뚜껑을 열고 물 시료를 천천히 주입한다. 피펫을 조심히 빼고 바이알의 뚜껑을 닫는다.
- 7) 뚜껑은 누수가 되지 않도록 꼭 닫고 각테일 용액과 시료가 혼합되도록 30 회 이상 충분히 흔든다.
- 8) 뚜껑에 지점, 채취일, 채취시간(시, 분) 등을 기록한다. 라돈은 기체이기 때문에 모든 시료채취 과정에서 손실되지 않도록 세심한 주의가 요구된다.
- 9) 4℃ 이하로 시료를 암소에서 보관하고 실험실로 가져온다.

## 2.3. 지하수 라돈 저감 방안

- 1) 폭기 : 라돈 제거에 가장 효율적인 방법, 기술적으로 90~99.9% 라돈 제거 가능
- 2) 활성탄처리 : 일반적으로 GAC(입자 활성탄) 시스템은 라돈 농도가 낮고 (740 Bq/L 이하 또는 20,000 pCi/L) 소수의 가정에 물을 공급하는 아주 작은 시스템의 경우 비용 측면에서 매우 효과적
- 3) 방치 : 비교적 낮은 농도의 라돈 제거에 사용
- 4) 끓임 : 비교적 높은 농도의 라돈이 함유된 소량의 물은 실내에서 환, 배기에 유의하여 끓이거나 실외에서 끓이면 빠른 시간에 손쉽게 제거 가능

## 2.4. 우라늄, 토륨(유도결합플라즈마 질량분석법)

우라늄(U), 토륨(Th) 표준용액(1 mg/L)은 표준원액(IV-ICP/MS-71A 10 mg/L)을 사용하여 조제하였으며, 본 조사에서는 민방위비상급수와 소규모 급수시설 및 마을상수도 등 지하수를 분석하였다. 전처리는 여과 과정을 거치지 않고 질산(65~70%, 특급) 처리 후 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Varian 720)를 사용하여 정량분석 하였다. 시험방법 및 시험조건은 먹는물수질공정시험기준(ES 05414.1a)에 따라 분석하였으며, <표. 1>에 ICP-MS 최적의 분석조건과 <표. 2>에 우라늄, 라돈, 토륨의 환경기준을 나타내었다.

<표. 1> ICP-MS 최적의 분석조건

	Condition
Model	Varian 720
Detector Mode	All digital Mode
Scanning Mode	Peak Hopping
Sample Introduction System	Cooled Spray chamber
Nebulizer gas flow	1.0 L/min
ICP RF power	1400 watts
Pump rate	1.5 mL/min
Carrier gas	Ar

<표. 2> 우라늄, 라돈, 토륨의 환경기준

항 목	구 분	WHO (먹는물 권고기준)	미국 (먹는물 권고기준)	한국 (먹는물 권고기준)
우라늄( $\mu\text{g/L}$ )		15	30	30
라돈(Bq/L)		-	148	148
토륨( $\mu\text{g/L}$ )		-	-	-

※ 라돈 : 한국 감시기준 148 Bq/L

<표. 3> 라돈, 우라늄, 토륨 분석 결과

구 분	시료수	평균 ( $\mu\text{g/L}$ )	표준편차	최대 ( $\mu\text{g/L}$ )	권고기준 초과 시료	초과율 (%)
Rn (Bq/L)	363	42.79	82.91	716.10	23	6.34
U ( $\mu\text{g/L}$ )	322	7.61	32.72	389.80	16	4.97
Th ( $\mu\text{g/L}$ )	258	0.0044	0.02180	0.1970	-	-

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 시료 분석결과

라돈의 경우 전체 시료에 대한 평균 농도는 42.79 Bq/L 이며, 표준편차는 82.91 이다. 한국과 미국의 먹는물 기준인 148 Bq/L를 초과하는 시료의 수는 23 개이며, 비율은 6.34% 이다. 최대농도는 716.10 Bq/L로 먹는물 기준에 4.8 배 정도 초과하고 있다.

우라늄의 경우 전체 시료에 대한 평균 농도는 7.61  $\mu\text{g/L}$  이며, 표준편차는 32.72 이다. 한국과 미국의 먹는물 기준인 30  $\mu\text{g/L}$ 를 초과하는 시료의 수는 16 개이며 비율은 4.97% 이다. 최대 농도는 389.80  $\mu\text{g/L}$ 로 먹는물 기준에 13배 정도 초과하고 있다.

토륨의 경우 국내외 환경기준은 없으나 P. Schramel (1997)에 따르면 ICP-MS의 검출한계가 1 ng/L로 매우 낮은 농도에서 토륨 분석이 가능하다.<sup>11)</sup> 앞서 언급한 검출한계를 기준으로 하였을 때 전체 시료에서 15 개의 시료가 검출한계 기준에 초과되며 검출된 비율은 5.81% 이다. 최대농도는 0.1970  $\mu\text{g/L}$ 이며, <표. 3>에 라돈, 우라늄, 토륨 분석 결과를 나타내었다.

## I. 연구사업

### 3.2. 시료 종류별 분석 결과

시료 종류에 따른 농도를 보았을 때, 라돈의 경우 민방위비상급수의 평균 농도가 46.28 Bq/L 이며, 환경 기준에 초과된 시료는 9 개이며, 비율은 9.18% 이다. 지하수의 평균 농도는 41.51 Bq/L 이며, 환경기준에 초과된 시료는 14 개이며 비율은 5.28% 이다. 우라늄의 경우 민방위비상급수의 평균 농도가 19.03  $\mu\text{g/L}$  이며, 환경 기준에 초과된 시료는 8 개이며, 비율은 12.50% 이다. 지하수의 평균 농도는 4.78  $\mu\text{g/L}$  이며, 환경기준에 초과된 시료는 8 개이며, 비율은 3.10% 이며, <표. 4>, <표. 5>, <그림. 1>에 나타내었다. 지하수, 민방위비상급수에 몇 몇의 시료는 건강상의 위해성을 가져올 수 있을 정도로

높은 농도의 우라늄을 포함하고 있으며, 지하수, 민방위비상급수 시료만으로 먹는물 시설이 방사성 물질에 취약하다고 판단하기에 부족하나, 지하수를 통한 먹는물 시설은 방사성 물질에 취약하다고 판단된다.

### 3.3. 경북 북부 각 지역에 따른 음용수의 라돈, 우라늄, 토륨의 평균 농도

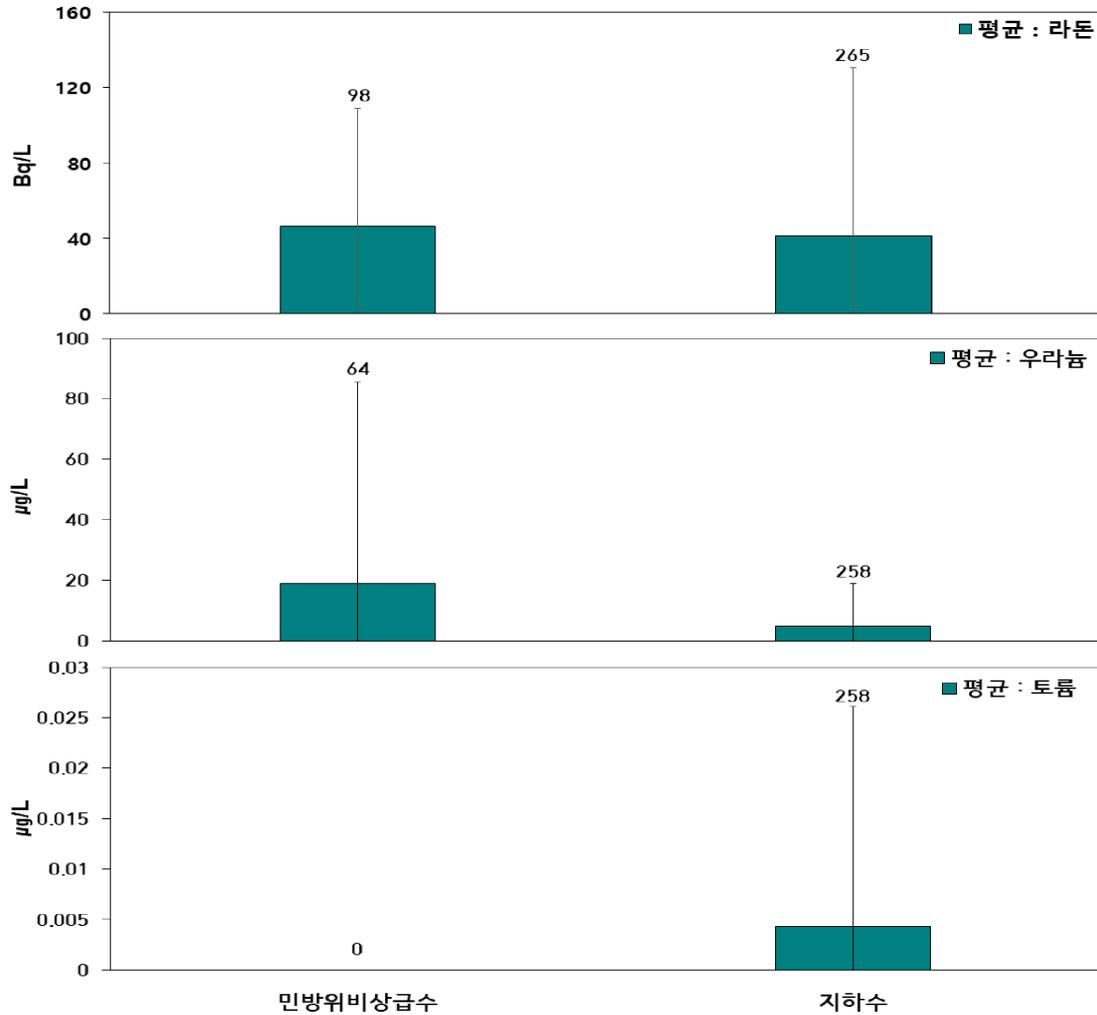
각 지자체별로 구분하여 분석한 결과 라돈의 경우 문경시가 평균 농도 92.94 Bq/L으로 가장 높게 나타났고 지자체는 평균 농도 기준으로 문경시 > 영주시 > 영덕군 > 봉화군 > 상주시 > 예천군 > 울진군 > 청송군 > 영양군 > 의성군 > 안동시 순으로 나타났다.

<표. 4> 시료 종류별 라돈, 우라늄, 토륨의 평균, 중앙, 최대 농도

시료 종류	Rn (Bq/L)			U ( $\mu\text{g/L}$ )			Th ( $\mu\text{g/L}$ )		
	평균	중앙값	최대값	평균	중앙값	최대값	평균	중앙값	최대값
민방위비상급수	46.28	22.00	282.90	19.03	0.60	389.80	-	-	-
지하수	41.51	12.70	716.10	4.78	0.71	103.40	0.004357	0.00	0.20
합계	42.79	17.35	716.10	7.61	0.66	389.80	0.004357	0.00	0.20

<표. 5> 시료 종류별에 따른 먹는물 기준에 초과된 시료의 수

시료 종류	Rn			U		
	시료 수	권고기준 초과 시료	초과율 (%)	시료의수	먹는물기준 초과 시료	초과율 (%)
민방위비상급수	98	9	9.18	64	8	12.50
지하수	265	14	5.28	258	8	3.10
총합계	363	23	6.34	322	16	4.97



<그림. 1> 시료 종류에 따른 라돈, 우라늄, 토륨의 평균 농도

※ 에러바는 표준편차를 나타내며, 에러바 위에 숫자는 샘플의 수

우라늄의 경우 영주시가 평균 농도 24.05 µg/L 으로 가장 높게 나타났고 지하체는 평균 농도 기준으로 영주시 > 예천군 > 울진군 > 봉화군 > 문경시 > 상주시 > 청송군 > 영양군 > 영덕군 > 의성군 > 안동시 순으로 <표. 6>에 나타내었다.

토륨의 경우 환경 기준은 없으나 지하체별로 비교했을 때 평균 농도가 0.0149 µg/L로 봉화군이 가장 높게 분석 되었으나 그 외 지하체는 평균 농도가 0.01 µg/L 이하로 나타났다.

## I. 연구사업

<표. 6> 경북 북부 지자체별에서 음용수의 평균, 최소, 최대 농도

채취 지역	Rn (Bq/L)			U (µg/L)			Th (µg/L)		
	평균	중앙값	최대값	평균	중앙값	최대값	평균	중앙값	최대값
문경	92.94	34.74	716.10	2.78	0.67	12.28	0.0007	0	0.0230
봉화	48.36	19.07	469.38	8.62	0.44	125.60	0.0149	0	0.1970
상주	39.88	11.92	325.34	2.50	0.71	23.62	0.0002	0	0.0060
안동	3.14	0.00	41.33	0.75	0.00	6.30	0.0000	0	0.0000
영덕	49.40	35.40	98.90	1.87	0.40	5.20	-	-	-
영양	12.49	14.30	20.84	2.05	2.41	3.56	0.0000	0	0.0000
영주	67.19	39.32	370.88	24.05	1.37	389.80	0.0047	0	0.0930
예천	24.93	16.84	115.12	12.23	0.59	99.44	0.0083	0	0.0720
울진	23.51	26.01	76.78	11.81	0.15	92.85	0.0000	0	0.0000
의성	8.83	7.71	38.20	1.31	1.30	4.40	0.0022	0	0.0760
청송	17.14	9.90	78.38	2.45	0.82	11.17	0.0006	0	0.0150

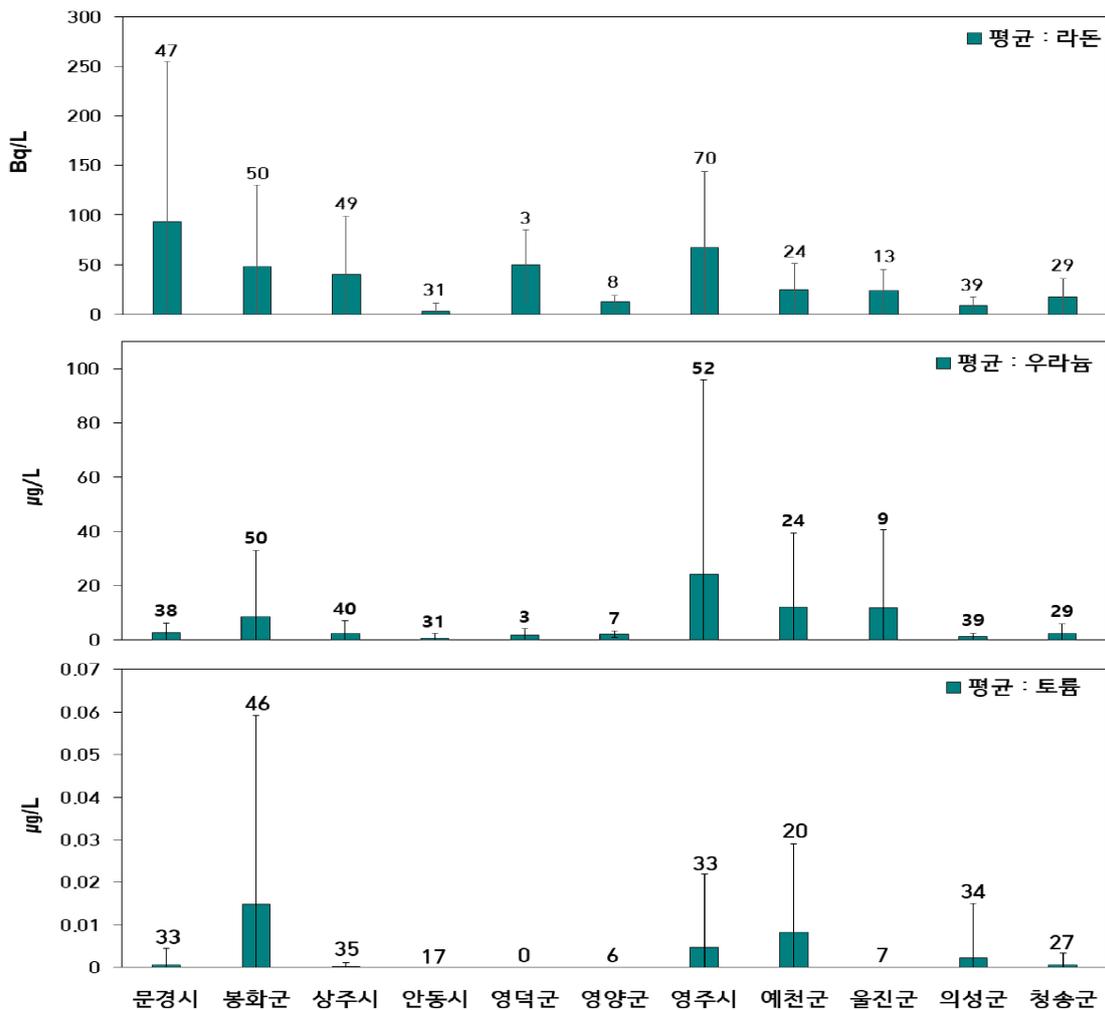
<표. 7> 경북 북부 지자체별 먹는물 기준에 초과된 시료의 수

채취 지역	Rn			U		
	시료의 수	권고 기준 초과 시료	초과율(%)	시료의 수	먹는물 기준 초과 시료	초과율(%)
문경	47	6	12.77	38	0	0.00
봉화	50	4	8.00	50	4	8.00
상주	49	4	8.16	40	0	0.00
안동	31	0	0.00	31	0	0.00
영덕	3	0	0.00	3	0	0.00
영양	8	0	0.00	7	0	0.00
영주	70	9	12.86	52	8	15.38
예천	24	0	0.00	24	3	12.50
울진	13	0	0.00	9	1	11.11
의성	39	0	0.00	39	0	0.00
청송	29	0	0.00	29	0	0.00
합계	363	23	6.34	322	16	4.97

먹는물 기준에 초과된 시료의 수를 분석하였을 때 라돈의 경우 영주시, 문경시, 상주시, 봉화군 순으로 나타났으며 초과된 시료의 수는 각각 9개, 6개, 4개, 4개, 이며 비율은 각각 12.86%, 12.77%, 8.16%, 8.00% 이다.

순으로 나타났으며 초과된 시료의 수는 각각 8개, 4개, 3개, 1개 이다. 비율은 각각 15.38%, 8.00%, 12.50%, 11.11% 이며, <표. 7>과 <그림. 2>에 나타내었다.

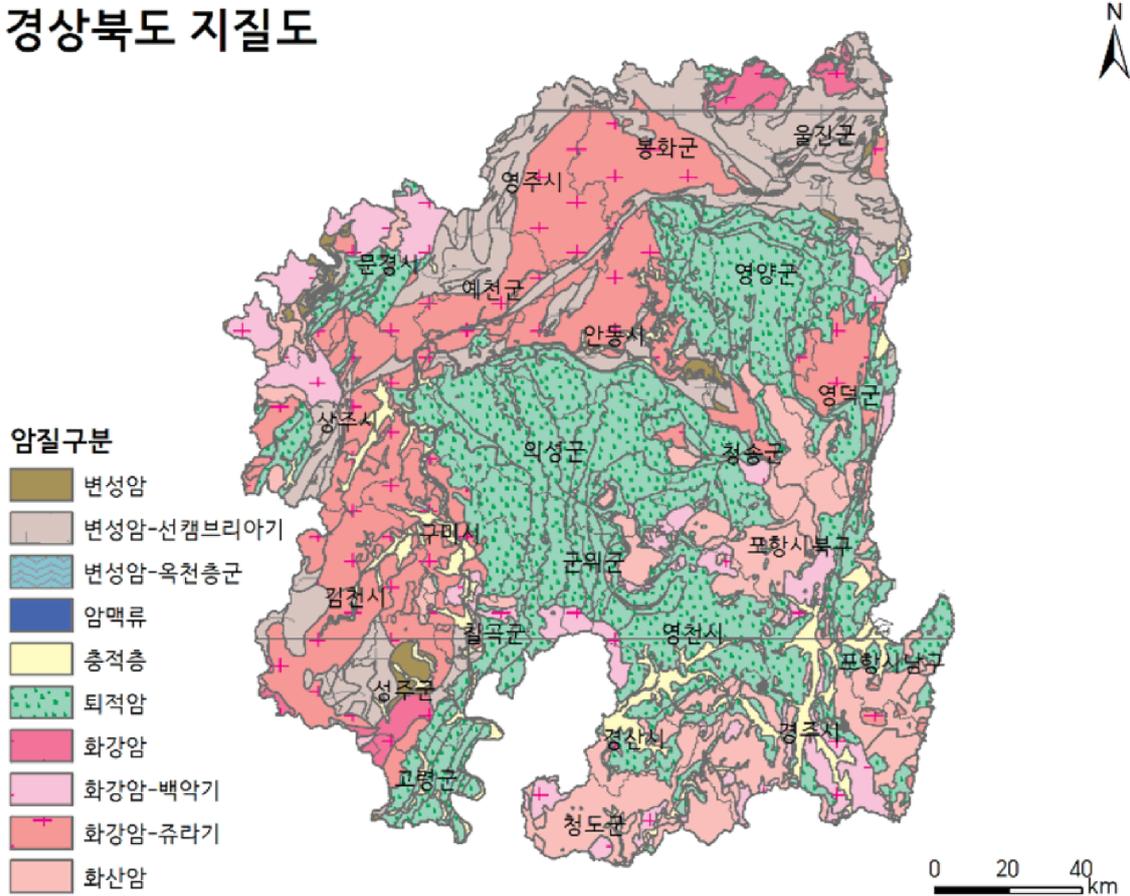
우라늄의 경우 영주시, 봉화군, 예천군, 울진군



<그림. 2> 경북 북부 지자체별에 따른 음용수에 라돈, 우라늄, 토륨의 평균 농도

※ 에러바는 표준편차를 나타내며, 에러바 위에 숫자는 샘플의 수

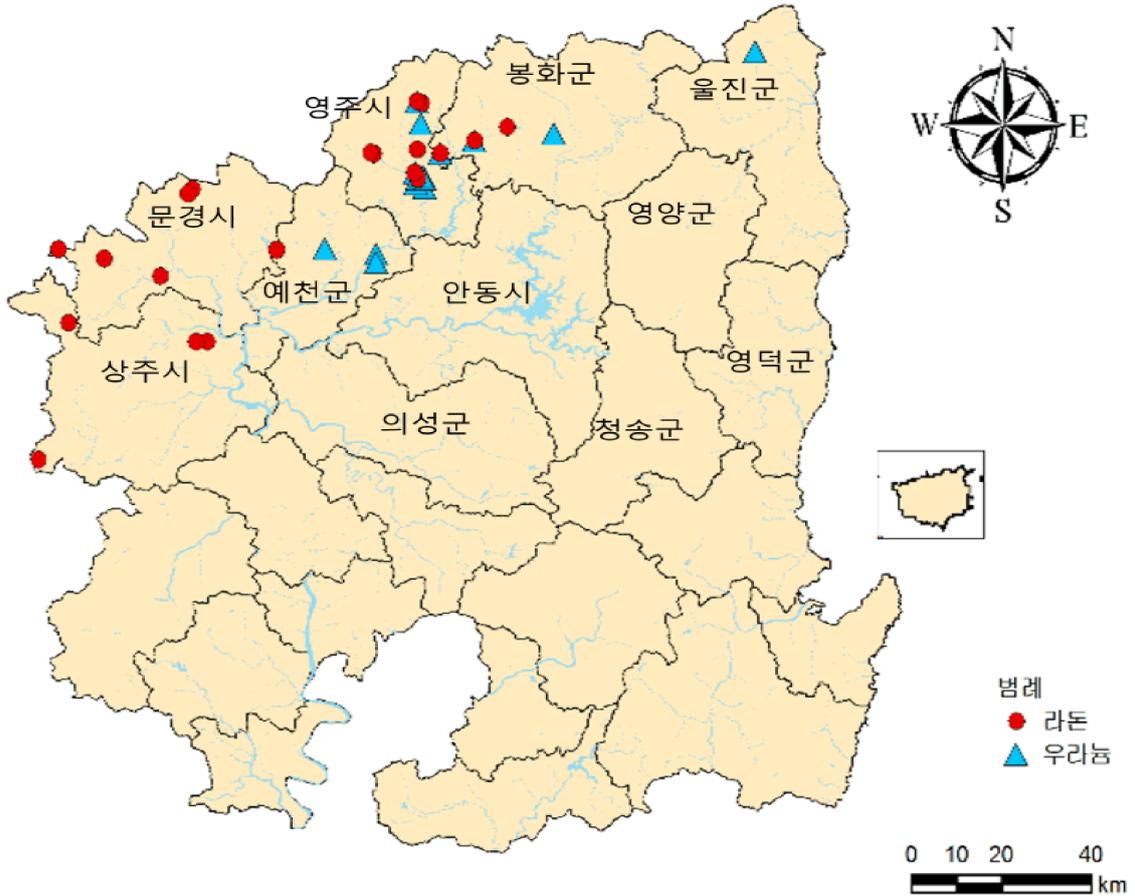
## 경상북도 지질도



<그림. 3> 경북 지역에 지질 지도

상기 초과된 시료들을 <그림. 4>에 표시하여 경상북도 지질 지도와 비교하였다. 라돈의 농도가 초과된 지역은 화강암-쥬라기, 화강암-백악기, 화강암이 많은 지역이다.

우라늄의 농도가 초과된 지역은 화강암-쥬라기, 화강암이 많은 지역이므로 라돈과 우라늄은 화강암 지역에 밀접한 연관성이 있으며 이 지역 지하수를 먹는물로 사용하는 경우에는 주민에게 영향을 미칠 것으로 판단된다.



<그림. 4> 경북 지역에서 환경기준에 초과된 라돈, 우라늄의 현황

## 4. 결론

경북북부지역의 지하수, 민방위비상급수의 먹는물 시료를 대상으로 라돈, 우라늄, 토륨의 농도를 조사하여 분석한 결과 값을 시료의 종류별, 지자체별로 구분 비교하여 결과를 얻었다.

라돈의 경우 6.38%가 시료 권고 기준을 초과하였으며, 우라늄은 4.97%가 먹는물 기준을 초과하였다. 토륨의 경우 환경 기준은 없으나 해외 논

문에 토륨의 농도가 0.001 - 0.027  $\mu\text{g/L}$  범위임 검출되었다.<sup>9)</sup>

시료 종류별 분류에서 몇몇 시료는 라돈과 우라늄의 기준치 농도에 각각 4.8 배, 13 배 초과되었으며, 경북북부지역에 먹는물 시설은 방사능 물질에 오염 가능성이 높다. 안전한 먹는물 공급을 위해 지하수, 민방위비상급수 뿐만 아니라, 소규모수도시설, 샘물 및 먹는 물 공동시설 등 추가적인 분석이 요구된다.

## I. 연구사업

문경시, 상주시, 예천군, 울진군은 전체 시료에 라돈과 우라늄의 평균 농도 이상 지역으로 환경 기준 초과된 시료가 나타났으며, 이 지역은 화강암 지형이 형성된 지역이다. 국내외 연구에 따르면 방사성 물질은 암질에 따라 함량이 달라지는데, 라돈과 우라늄은 화강암 지역에 함량이 높게 발생 된다고 보고되었다.<sup>7)</sup>

위에 언급한 지역은 라돈, 우라늄과 같은 방사성 물질에 영향을 받을 수 있는 지역이며, 지하수와 같은 먹는물 시설에서 방사성 물질이 발생할 수 있다. 화강암 지역에서 음용수를 이용하는 주민들에게 안전한 먹는물 공급을 위한 대책 마련이 필요하며, 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 여겨진다.

앞으로 본 연구조사는 경북 북부지역의 지하수 및 민방위 비상급수 대상으로 지역주민의 방사능 피해방지를 위해 우라늄, 라돈, 토륨 농도 측정결과를 국내외 수질 기준과 비교하여 지질적 특성 및 행정적 구역으로 나누어 고찰하였으며 지역주민에게 안전한 먹는물 공급을 위한 기초자료로 제시하고자 하였다.

## 참고 문헌

1. 박선구, 임연택, 외국에서의 지하수 중 방사성 물질 관리에 대한 고찰(Ⅰ)-우라늄, 라듐, 전알파-, 한국물환경학회지, 19(6), 585-597(2003).
2. 신동천, 김예신, 박화성, 박선구, 조병욱, 성익환, 먹는물중 방사성 물질의 관리방안(2011).
3. 오영미, 이종복, 신경진, 김학철, 이재희, 황상철, 정상기, 이상태, 지하수와 지표수에서의 라돈 우라늄의 실태 조사, 한국물환경학회지, 23(2), 201-205(2007).
4. 이병대, 조병욱, 김문수, 황재홍, 문경지역 지하수의 수리지화학 및 우라늄과 라돈의 산출 특성, 자원환경지질, 51(6), 553-566(2018).
5. 이해근, 차상덕, 김정집, 김영훈, 경북지역의 먹는 물에서 우라늄 검출 특성, 한국광물학회지, 27(4), 235-242(2014).
6. 조병욱, 김문수, 김태승, 윤욱, 이병대, 황재홍, 추창오, 단양지역 지하수중 자연방사성물질 우라늄과 라돈의 산출과 분포특징, 대한지질공학회지, 23(4), 477-491(2013).
7. 조병욱, 추창오, 윤욱, 이병대, 황재홍, 김문수, 경상남북도 지하수 중 자연방사성물질 우라늄과 라돈의 산출특징과 함량분포에 대한 수리지화학적 연구, 대한지질공학회지, 23(4), 551-574(2014).
8. R. W. Leggett, The behavior and chemical toxicity of U in the kidney: A reassessment, Health Physics, 57(3), 365-383(1989).
9. T. Bacquart, K. Bradshaw, S. Frisbie, E. Mitchell, G. Springston, J. Defelice, H. Dustin, B. Sarkar, A survey of arsenic, manganese, boron, thorium, and other toxic metals in the groundwater of a West Bengal, India neighbourhood, Metallomics, 2012(4), 653-659(2012).
10. Van Kaick, et al., (1999), The German Thorotrast Study: Recent Results and Assessment of Risks, Radiation research 152, S64-S71.
11. P. Schramel, I. Wendler, P. Roth, E. Werner, Method for the Determination of Thorium and Uranium in Urine by ICP-MS, Mikrochim. Acta 126, 263-266(1997).