

# 옥천층군 일대의 지표방사능과 감마선량 평가

윤 옥 · 조병욱\*

한국지질자원연구원 지하수연구센터 책임연구원

## Evaluation of Terrestrial Gamma Radiation and Dose Rate of the Ogcheon Group Area

Uk Yun · Byong-Wook Cho\*

Principal Researcher, Groundwater Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

### Abstract

We evaluated the distributions of primordial radionuclides and effective dose rate of the Ogcheon Group, which includes rocks with high uranium content. Terrestrial gamma radiation was measured at 421 points using a portable gamma ray spectrometer. Dividing the study area into five geological units (og1, og2, og3, og4, and igneous rocks) revealed no significant difference in the concentration of surface radioactivity among the types. The concentrations of  $^{40}\text{K}$ , eU, and eTh for all samples ranged from 0.7% to 10.3% (average 5.2%), 0.6 to 287.0 ppm (average 8.5 ppm), and 4.0 to 102.4 ppm (average 31.3 ppm), respectively. The absorbed dose rate in the study area (calculated from the activity concentrations of  $^{40}\text{K}$ , eU, and eTh) was in the range of 28.84 to 1,714.5 nGy/h (average 195.4 nGy/h). Among the five geological units, the lowest average was 166.3 nGy/h (for og1) and the highest average was 233.3 nGy/h (for og2; median 198.1 nGy/h). The outdoor effective dose rate for the area obtained from the absorbed dose rate was in the range of 0.04 to 2.10 mSv/y (average 0.24 mSv/y). Except for the four sites located in the uranium-bearing coal bed of og2, none of the studied sites exceeded 1 mSv/y.

**Keywords:** gamma ray spectrometry, gamma dose rate, terrestrial gamma radiation, Ogcheon group, absorbed dose rate, effective dose rate

### 초 록

일부 암석의 우라늄 함량이 높은 것으로 알려진 옥천층군 지역의 유효선량을 파악하기 위하여 휴대용 감마선분광분석기를 이용하여 421개 지점에서 지표방사능( $^{40}\text{K}$ , eU, eTh)을 측정하였다. 연구지역을 5개의 지질(og1, og2, og3, og4, 화성암)로 구분했을 때 지질별 지표방사능 강도에는 큰 차이가 없었다. 전체 421 암석의  $^{40}\text{K}$ , eU, eTh의 함량은 각각 0.7~10.3% (평균 5.2%), 0.6~287.0 ppm (평균 8.5 ppm), 4.0~102.4 ppm (평균 31.3 ppm) 을 보였다. 방사능강도로부터 구한 연구지역의 흡수선량은 28.84~1,714.5 nGy/h의 범위로서(평균 195.4 nGy/h) 지질별 평균값 최저는 og1의 166.3 nGy/h, 최고는 og2의 233.3 nGy/h (중앙값은 198.1 nGy/h)였다. 흡수선량으로부터 구한 연구지역의 옥외 유효선량은 0.04~2.10 mSv/y (평균 0.24 mSv/y)의 범위이며 함 우라늄층이 협재된 og2에 위치한 4개 지점을 제외하면 옥외 유효선량이 1 mSv/y를 넘는 지점은 없었다.

**주요어:** 감마선분광분석기, 감마선량, 지표방사능, 옥천층군, 흡수선량, 유효선량

### OPEN ACCESS

\*Corresponding author: Byong-Wook Cho  
E-mail: cbw@kigam.re.kr

Received: 10 November, 2020  
Accepted: 24 November, 2020

© 2020 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서론

지구상의 사람은 항상 자연방사선에 노출되어 있다. 자연방사선의 근원은 우주선과 지표방사능으로 나눌 수 있으나 인체 노출 평가에 있어서는 지표방사능에 의한 감마선량이 중요하다. 자연방사선에 의한 인체 피폭량은 세계 평균이 2.4 mSv/y로 낮아 인체에 미치는 위해성이 낮은 것으로 보고되고 있으나(UNSCEAR, 1993) 장기간 노출되면 폐암 등 여러 질병이 유발될 가능성이 높아진다(UNSCEAR, 2008). 국내 자연방사선의 인체 피폭량 평균은 세계 평균보다 약간 높은 약 3.08 mSv/y 정도로 보고되고 있는데 이 중에서 지표방사능에 의한 피폭량은 약 1.04 mSv/y로 알려져 있다(KINS, 2006).

지표방사능은 주로 암석 내 방사성물질( $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ )과 라돈에 의해 발생하나 라돈이 기체이고 반감기가 짧은 특성 때문에 옥외 지표방사능에 대한 라돈의 기여는 거의 없는 것으로 알려져 있다(Kávási et al., 2010). 지표방사능의 측정 방법은 열형광선량계(Thermoluminescence dosimetry, TLD) 등에 의한 직접 측정 방법과 감마선분광분석기(Gamma-ray spectrometry) 등에 의한 간접적인 측정방법으로 나눌 수 있다(Kim et al., 2013). 감마선분광분석기를 이용한 국내 특정 지역의 지표방사능 세기에 대한 연구는 대전시 유성지역 46개 지점(NIER, 2008), 양평군 양동지역 72개 지점(NIER, 2009), 괴산군 200개 지점(NIER, 2012), 용인시 원삼지역 100개 지점(NIER, 2013), 괴산군 청천지역 77개 지점(Yun and Cho, 2019) 등을 들 수 있다.

연구지역은 옥천층군이 분포하는 지역으로 지층 내 일부에서는 우라늄 함량 최고치가 294 ppm (Kim, 1989)이나 되는 것으로 알려져 있으며 우라늄 함량이 높은 지역을 중심으로 과거 우라늄 광상 탐사가 이루어진 바 있다. 본 연구의 목적은 휴대용 감마선분광분석기를 이용하여 옥천층군과 옥천층군 주변의 421개 지점에서 K, eU, eTh 함량을 측정하고 이를 이용하여 방사능강도를 계산하여 옥천층군 일대의 지질대별 흡수선량과 옥외 유효선량을 파악함에 있다.

## 지형 및 지질

연구지역은 충주, 괴산, 보은, 대전, 금산, 완주간의 옥천층군 분포대를 중심으로 길이 120 km, 폭 20~30 km인 지역으로서 총 면적이 5,100 km<sup>2</sup> 정도에 이른다(Fig. 1). 북북동-남남서 방향으로 연장 분포하는 옥천층군은 1:250,000 안동, 대전, 광주 지질도폭에 걸쳐 있다. 본역은 크게 보아 시대미상의 옥천층군과 중생대의 화성암류로 구분이 되며(Fig. 2) 지구 조적으로 보면 옥천층군 하부는 경기육괴에 접하고 있다. 옥천층군은 다시 하부로부터 변성사질암대(og1), 하부천매암대(og2), 함력천매암대(og3), 상부천매암대(og4)로 구분되며 중생대 화성암이 옥천층군에 관입 또는 분출하고 있다. og1은 암갈색 내지 암화색의 사질 기원의 운모편암 혹은 사질천매암으로 구성되며 규암 및 석회암이 협재하는데 장암리층, 미동산층, 대향산층, 윤교리층이 이에 속한다. 하부천매암대(og2)는 주로 천매암, 점판암으로 이루어지며 국부적으로 탄질세일이 협재하며 창리층, 서창리층이 이에 해당한다. 협재된 일부 탄질세일의 우라늄 함량은 높은 것으로 알려져 있다(Kim, 1989; Shin and Kim, 2011). 함력천매암대(og3)는 황강리, 이원리층으로 명명된 지층으로 규암, 석회암, 화강암, 편마암, 천매암 등의 다양한 성분의 역을 함유한 천매암질 혹은 석회질과 규질 석기로 이루어져 있는데 이들은 대규모 쇄설류(debris flow)에 의한 것으로 알려지고 있다. 상부천매암대(og4)는 옥천층군 최상위층으로 회색 내지 암녹색의 천매암과 운모편암으로 구성되며 박층의 백색결정질 석회암이나 박층의 규암이 협재되어 있다.

옥천층군 지층의 일부와 그 주변에는 주라기 화강암류, 백악기화강암과 화산암, 산성 암맥류가 관입, 분출하였는데 옥천층군의 지층과 화성암류 지역의 흡수선량과 옥외 유효선량을 비교하기 위하여 이 지역에서도 지표방사능이 측정되었다.

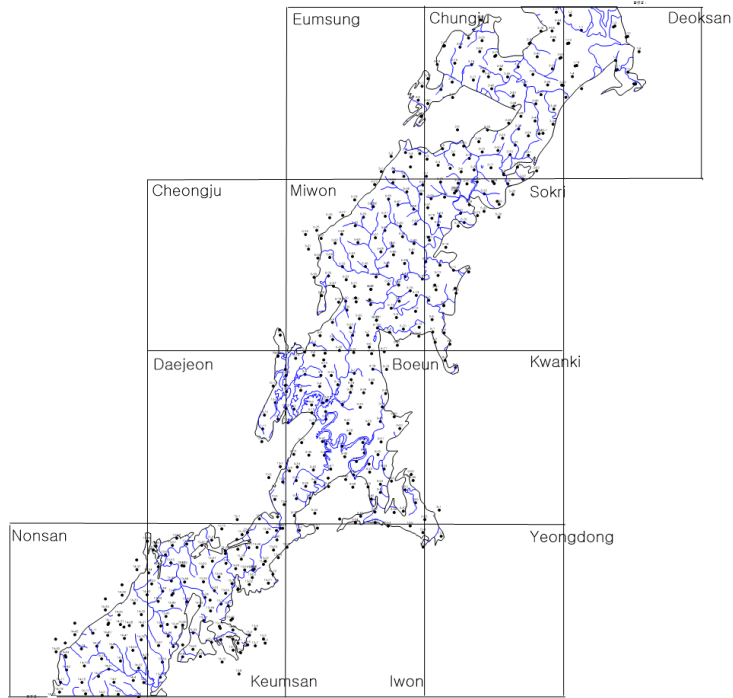


Fig. 1. Sample location map of the study area.

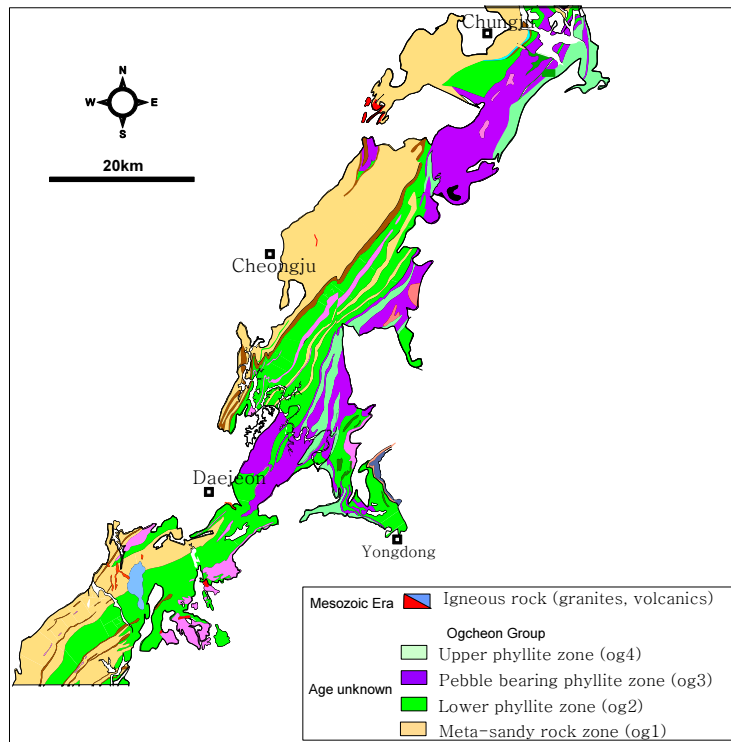


Fig. 2. Geological map of the study area.

## 연구방법

연구지역에서의 지표방사능 측정 지점은 대부분 암석 노두에서 이루어졌으며 암석 노두가 없는 경우에는 우라늄과 토륨의 이동이 거의 일어나지 않은 풍화암 또는 풍화토에서 이루어졌다. 또한 측정 지점은 연구지역의 면적을 고려하여 가능한 한 일정 거리(3 km 내외)를 유지하여 측정 지점의 대표성을 높이고자 하였다(Fig. 1). 현장 측정에 사용된 감마선분광분석기(GR-320A enviSPEC device, SAIC, Fugro Instruments, Australia)의 측정 오차범위는 0.1% 내외이다. 감마선분광분석기는 256 채널 pulse 높이의 분석기로서 주요 성분은  $10 \times 7.5$  cm NaI(Tl) 결정으로 구성되며, 검출기는 10 cm 두께의 Pb 벽으로 구성된 저 배경치 차폐물로 둘러싸여 있다. 암석의 지표방사능 측정은 검출기 probe를 암석 노두에 수직으로 밀착시킨 후 현장 적용성(측정시간, 재현성 및 정확도)에 가장 효율적인 300초간 이루어졌다.

지표방사능이 측정된 연구지역 421개 지점 암석의  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  함량은 검출기의 기기 내부 보정 상수를 이용하여 K의 %, U의 ppm 농도(eU), Th의 ppm 농도(eTh) 환산하였다. eU는 무게의 등가 U 농도로서 Bi214를 직접 측정하여 간접적으로 U 농도를 측정한다. eTh는 무게의 등가 Th 농도로서 Ti208를 직접 측정하여 간접적으로 Th 농도를 측정한다.

지표방사능이 측정된 421개 지점의  $^{40}\text{K}$  (%), eU (ppm), eTh (ppm)의 농도는 다음과 같은 Conversion factor에 의해 방사능강도로(Bq/kg) 환산되었다(IAEA, 2003).

$$1\% \text{ } ^{40}\text{K} = 313 \text{ Bq/kg}$$

$$1 \text{ ppm } ^{238}\text{U} = 12.35 \text{ Bq/kg}$$

$$1 \text{ ppm } ^{232}\text{Th} = 4.06 \text{ Bq/kg}$$

K (%), eU (ppm), eTh (ppm)의 농도로부터 환산된 방사능 강도는 다음의 식을 이용하여 흡수선량(Absorbed dose rate)으로 변환하였다(UNSCEAR, 2000). 이때  $^{238}\text{U}$ 과  $^{226}\text{Ra}$  사이에는 영속평형이(secular equilibrium) 이루어졌다고 가정한다.

$$D = 0.0417 C_K + 0.462 C_U + 0.621 C_{Th}$$

D : 흡수선량(nGy/h)

$C_K$  : Activity concentration of  $^{40}\text{K}$

$C_U$  : Activity concentration of  $^{238}\text{U}$

$C_{Th}$  : Activity concentration of  $^{232}\text{Th}$

연간 유효선량은 위의 흡수선량을 이용하여 다음 식을 이용하여 환산하였다(UNSCEAR, 2000). 일반적으로 사람들은 20%는 옥외 공간, 80%는 실내공간에서 생활한다고 보아 실내 연간 유효선량은 0.8을, 실외 연간 유효선량은 0.2를 적용한다.

$$H_E = D \times T \times F$$

$H_E$  : 연간 유효선량(mSv/y)

D : 흡수선량(nGy/h)

T : 연간 실내/옥외 체류시간 0.2 혹은  $0.8 \times (24 \times 365.25 = 8,760)$

F : 환산계수( $0.7 \times 10^{-6}$  Sv/Gy)

## 연구결과

### 지질대별 암석의 지표방사능

연구지역 421개 지점 암석의 지표방사능을 측정하였는데 5개 지질대별 <sup>40</sup>K, eU, eTh 함량에 대한 통계자료는 Table 1 과 같이 지질별 <sup>40</sup>K, eU, eTh 함량에는 큰 차이가 없는데 이는 옥천층군인 og1, og2, og3, og4의 구성 암석의 지화학이 비슷함을 시사한다.

**Table 1.** Statistics for potassium, uranium, and thorium concentrations in the five geological units measured by gamma ray spectrometry

Lithology	No. of samples	Statistics	Elemental concentration		
			K (%)	eU (ppm)	eTh (ppm)
og1	134	Min.	0.70	0.97	6.21
		Max.	9.91	15.44	77.93
		Mean	4.90	4.79	29.73
		Med.	5.02	4.31	29.75
og2	144	Min.	0.65	0.63	5.85
		Max.	9.90	287.0	102.4
		Mean	5.20	14.86	32.01
		Med.	5.21	5.98	31.73
og3	63	Min.	1.88	1.43	9.82
		Max.	9.12	43.89	76.47
		Mean	4.90	5.18	30.00
		Med.	4.40	4.12	24.80
og4	21	Min.	1.00	2.49	17.50
		Max.	8.26	10.98	69.98
		Mean	6.07	5.76	39.09
		Med.	6.71	5.57	37.38
Igneous rocks	59	Min.	1.00	1.00	4.00
		Max.	10.29	19.82	72.37
		Mean	5.80	6.24	31.74
		Med.	6.03	5.15	27.80
Total	421	Min.	0.65	0.63	4.00
		Max.	10.29	287.0	102.4
		Mean	5.19	8.54	31.30
		Med.	5.28	4.86	30.20

연구지역 전체 암석의 <sup>40</sup>K 함량 범위는 0.65~10.29% (평균 5.19%)이다. 421개 암석의 <sup>40</sup>K의 함량은 주로 중생대 복운모 화강암, 흑운모화강암으로 이루어진 대전시 유성지역 46개 암석의 함량인 1.5~6.9% (평균 4.18%)(NIER, 2008), og1, og2, og3와 백악기화강암과 류라기화강암으로 이루어진 괴산군 200개 암석의 <sup>40</sup>K의 함량인 0.6~7.6% (평균 3.63%)(NIER, 2012), 주로 류라기화강암으로 구성된 양평군 양동지역 72개 암석의 <sup>40</sup>K의 함량인 1.1~7.2% (평균 4.70%)(NIER, 2009), 용인시 원삼지역 100개 암석의 <sup>40</sup>K의 함량인 1.7~6.8% (평균 4.42%)(NIER, 2013)보다 높은 것으로 나타난다. 421개 측정 자료를 이용하여 작성된 <sup>40</sup>K 함량 분포는 Fig. 3과 같은데 뚜렷한 이상대를 보여주지는 않는다. 지질별 암석의 <sup>40</sup>K 함량은 og4에서 가장 높아서 1.0~8.26%의 범위(평균 6.07%)이다. 나머지 3개 옥천층군의 <sup>40</sup>K 함량은 비슷한데 og1의 <sup>40</sup>K 함량은 0.70~9.91% (평균 4.90%), og2의 <sup>40</sup>K 함량은 0.65~9.90% (평균 5.20%), og3의 <sup>40</sup>K 함량은 1.88~9.12% (평균, 4.90%)를

보인다. 한편 옥천층군에 관입 또는 옥천층군 주변에 관입한 화성암의  $^{40}\text{K}$  함량은 1.00~10.29% (평균 5.80%)의 범위를 보여 4개 옥천층군 암석의  $^{40}\text{K}$  함량보다 약간 높으며(Table 1), 대전시 유성지역 주라기화강암 46개 지점의  $^{40}\text{K}$  평균함량인 4.18%보다도(NIER, 2008) 높다.

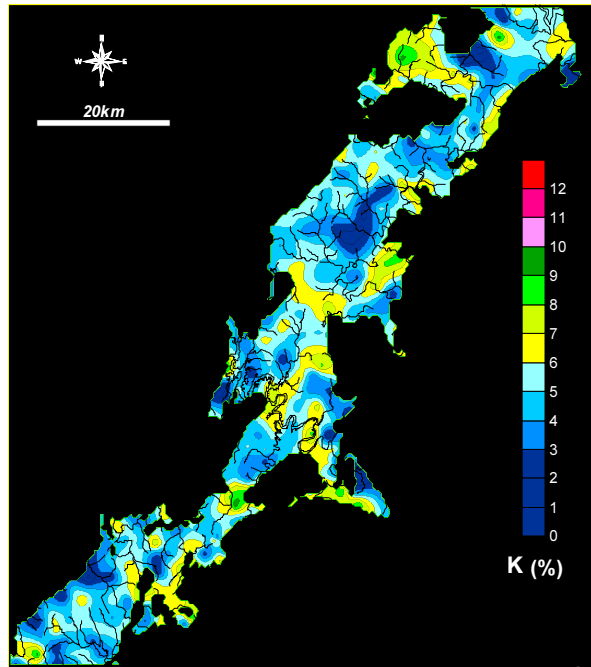


Fig. 3. Distribution of potassium concentration in the study area.

연구지역 421개 암석의 eU 함량은 0.63~287.0 ppm (평균 8.54 ppm, 중앙값 4.186 ppm)이다. 421개 암석의 eU 함량 분포는 Fig. 4와 같은데 eU 함량이 높은 지점은 국부적으로 og2 또는 og2와 화성암의 경계부에서 뚜렷하게 나타난다. eU의 지질별 함량은 og2에서 가장 높는데 함량 범위는 0.63~287.0 ppm (평균 14.86 ppm, 중앙값 5.98 ppm)으로 나타난다. 다음으로는 화성암의 eU 함량이 높는데 1.00~19.82 ppm (평균 6.24 ppm)의 범위를 보인다. 연구지역 59개 화성암의 eU 함량은 세계 화강암의 평균 우라늄 함량으로 알려진 5.0 ppm (Siegel and Bryan, 2003), 대전시 유성지역 46개 주라기화강암의 평균 함량 3.65 ppm (NIER, 2008), 괴산군 56개 주라기화강암의 평균 함량인 3.81 ppm보다는 높으나, 괴산군 25개 백악기화강암의 eU 평균 함량인 7.46 ppm보다는 낮다(Cho, 2017). og1과 og3, og4의 eU 함량은 각각 0.97~15.44 ppm (평균 4.79 ppm), 1.43~43.89 ppm (평균 5.18 ppm), 2.49~10.98 ppm (평균 5.76 ppm)의 범위를 보여 대체로 og2의 eU 함량보다는 낮은 편이다. 옥천층군 4개 지질대 중에서 eU 최고함량은 og2의 287.0 ppm이나 og1과 og3의 최고함량도 각각 15.44 ppm, 43.89 ppm이나 되어서 og2 뿐만 아니라 og1, og3 등에서도 국부적으로 U 함량이 높은 지점이 나타난다. 연구지역 421개 암석의 우라늄 함량은 대전시 유성지역 46개 암석의 1.2~10.5 ppm (평균 3.65 ppm)(NIER, 2008), 괴산군 200개 암석의 1.1~14.9 ppm (평균 4.31 ppm)(Cho, 2017), 양평군 양동지역 72개 암석의 2.4~12.0 ppm (평균 5.0 ppm)(NIER, 2009)보다 높으나 용인시 원삼지역 100개 암석의 함량인 2.0~12.7 ppm (평균 5.6 ppm)(NIER, 2013)보다는 낮다.

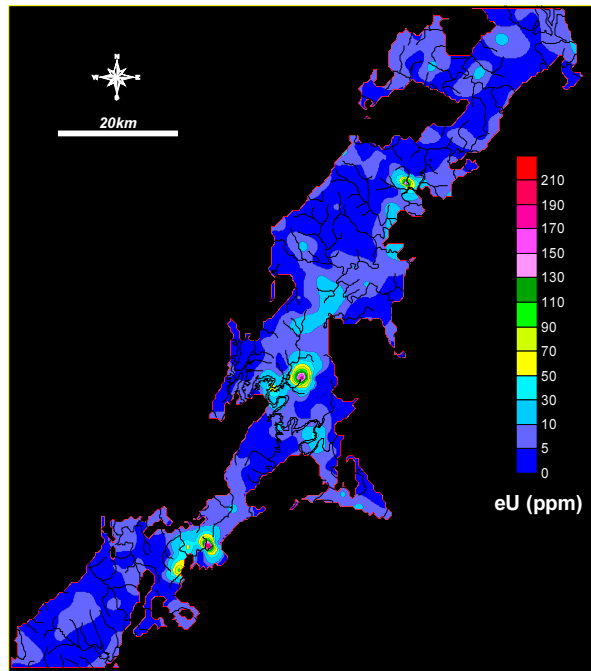


Fig. 4. Distribution of equivalent uranium concentration in the study area.

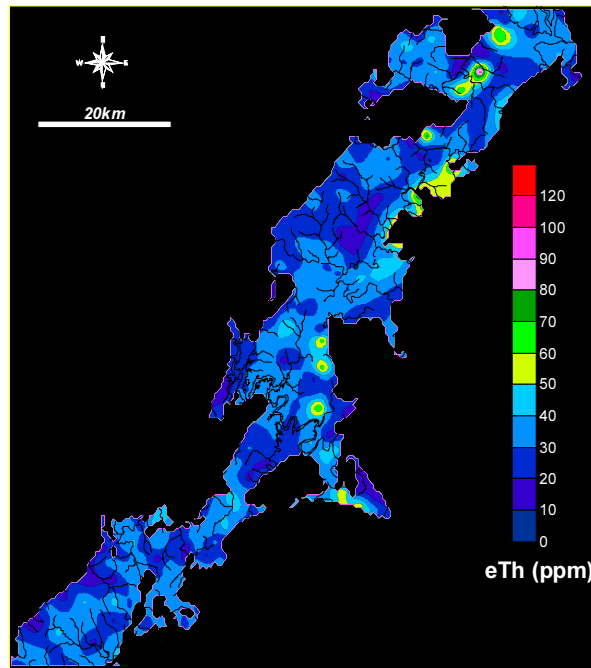


Fig. 5. Distribution of equivalent thorium concentration in the study area.

연구지역의 421개 암석의 eTh 함량 분포는 Fig. 5와 같은데 eTh의 경우는 괴산군 청천면 일대 등에서 이상대를 보인다. 지질대별 eTh 함량은 og4에서 가장 높아서 17.50~69.98 ppm (평균 39.09 ppm)을 보인다. 다음으로는 og2의 5.85~102.4 ppm (평균 32.01 ppm), 화성암의 4.00~72.37 ppm (평균 31.74 ppm), og3의 9.82~76.47 ppm (평균 30.00 ppm), og1의



6.21~77.93 ppm (평균 29.73 ppm)의 순서로 함량을 보인다(Table 1). 연구지역 전체의 eTh 함량은 4.00~102.4 ppm으로 (평균 31.30 ppm), 대전시 유성지역 46개 암석의 eTh 함량인 6.2~47.2 ppm (평균 16.7 ppm)(NIER, 2008), 괴산군 200개 암석의 eTh 함량인 8.0~77.2 ppm (평균 함량 21.8 ppm)(NIER, 2012), 양평군 양동지역 72개 암석의 6.0~50.4 ppm (평균 21.6 ppm)(NIER, 2009)보다는 높으나, 용인시 원삼지역 100개 암석의 함량인 11.7~66.5 ppm (평균 33.3 ppm) 보다는 낮다.

### 지질대별 흡수선량

감마선분광분석기로 측정된 5개 지질대 암석의  $^{40}\text{K}$ , eU, eTh 함량을 바탕으로 흡수선량을 구하기 위하여 먼저 측정된 지표방사능을 방사능강도로 변환하였다(IAEA, 2003). 총 421개 암석의  $^{40}\text{K}$ 의 함량은 0.65~10.29%, eU의 함량은 0.63~287.0 ppm, eTh의 함량은 4.00~102.4 ppm의 범위인데(Table 1) 이를 방사능강도로 환산하면  $^{40}\text{K}$ 에 의한 방사능강도는 204.9~3,219.9 Bq/kg (평균 1,623.4 Bq/kg), eU에 의한 방사능강도는 7.81~3,544.5 Bq/kg (평균, 105.5 Bq/kg), eTh에 의한 방사능강도는 16.24~415.9 Bq/kg (평균 127.9 Bq/kg)를 보인다(Table 2). 따라서 연구지역의 방사능강도에 기여하는 방사성물질은 og2에 속하는 일부 고 eU 지점들을 제외하고는(Fig. 4) 지질대에 관계없이  $^{40}\text{K}$ 가 87.4%로 절대적으로 큰 영향을 미친다.

**Table 2.** Statistics for calculated activity concentrations of five geological units in the study area

Lithology	No. of samples	Statistics	Activity concentration (Bq/kg)		
			$^{40}\text{K}$	eU	eTh
og1	134	Min.	218.31	11.93	25.22
		Max.	3,102.3	190.7	316.4
		Mean	1,534.2	59.12	120.7
		Med.	1,570.9	53.28	120.8
og2	144	Min.	204.9	7.81	23.74
		Max.	3,098.7	3,544.5	415.9
		Mean	1,626.6	183.5	130.0
		Med.	1,631.8	73.90	128.8
og3	63	Min.	587.3	17.69	39.87
		Max.	2,855.0	542.1	310.5
		Mean	1,533.0	63.93	121.8
		Med.	1,377.2	50.89	100.7
og4	21	Min.	313.0	30.70	71.05
		Max.	2,586.7	135.6	284.1
		Mean	1,901.2	71.18	158.7
		Med.	2,101.1	68.75	151.8
Igneous rocks	59	Min.	313.0	12.35	16.24
		Max.	3,219.9	244.8	293.8
		Mean	1,816.4	77.05	128.9
		Med.	1,887.2	63.56	112.9
Total	421	Min.	204.9	7.81	16.24
		Max.	3,219.9	3,544.5	415.9
		Mean	1,623.4	105.5	127.9
		Med.	1,653.8	59.99	122.6



지질별 <sup>40</sup>K의 평균 방사능강도에는 큰 차이가 없는데 최저는 og3의 1,533.0 Bq/kg이고 최고는 og4의 1,901.2 Bq/kg이다. 지질별 eU의 평균 방사능강도는 최저는 og1의 59.12 Bq/kg이고, 최고는 og2의 183.5 Bq/kg (중앙값 73.85 Bq/kg)이다. 특히 og2의 일부 암석의 eU 최고치는 3,544.5 Bq/kg에 달한다. 지질별 eTh의 평균 방사능강도에도 큰 차이가 없는데 최소는 og1의 120.7 Bq/kg, 최고는 og4의 158.7 Bq/kg이다.

421개 지점 암석의 방사능강도를 흡수선량(Absorbed dose rate)으로 변환한 뒤(UNSCEAR, 2000) 5개 지질별 암석의 흡수선량을 정리하였다(Table 3). 전체 흡수선량 중에서 <sup>40</sup>K, eU, eTh가 차지하는 비중은 각각 34.7%, 24.9%, 40.4% 정도로 용인시 원삼지역 100개 지점의 33.0%, 18.9%, 48.1% (NIER, 2013), 세계 평균으로 알려진 32.9%, 15.6%, 51.5% (UNSCEAR, 1982)와 비슷한 편이나 대전시 유성지역 46개 지점(46.4%, 17.7%, 35.9%)과 양평군 양동지역 72개 지점(41.5%, 19.4%, 39.0%)과는 약간 다르게 나타났다.

**Table 3.** Statistics of the calculated outdoor effective dose rates of five geological units in the study area

Lithology	No. of samples	Statistics	Absorbed dose rate (nGy/h)	Outdoor effective dose rate (mSv/y)
og1	134	Min.	32.31	0.04
		Max.	389.9	0.48
		Mean	166.3	0.20
		Med.	166.6	0.20
og2	144	Min.	40.82	0.05
		Max.	1,714.5	2.10
		Mean	233.3	0.29
		Med.	198.1	0.24
og3	63	Min.	60.94	0.07
		Max.	468.0	0.57
		Mean	169.1	0.21
		Med.	146.8	0.18
og4	21	Min.	74.86	0.09
		Max.	334.6	0.41
		Mean	210.7	0.26
		Med.	222.4	0.27
Igneous rock	59	Min.	28.84	0.04
		Max.	338.3	0.42
		Mean	191.4	0.24
		Med.	186.4	0.23
Total	421	Min.	28.84	0.04
		Max.	1,714.5	2.10
		Mean	195.4	0.24
		Med.	179.0	0.22

421개 지점의 흡수선량은 28.84~1,714.5 nGy/h의 범위로서(평균 195.4 nGy/h)(Table 3) 세계 평균으로 알려진 59 nGy/h (Alomari et al., 2019)보다 높다. 연구지역의 흡수선량은 og1, og2, og3, 백악기화강암으로 이루어진 괴산군 청천 지역 77개 지점의 흡수선량인 68~1,394 nGy/h (평균 230 nGy/h)보다 약간 낮으나(Yun and Cho, 2019), 대전시 유성지역 46개 암석의 57.8~203.7 nGy/h (평균 116.6 nGy/h)(NIER, 2008), 양평군 양동지역 72개 암석의 58.7~221.3 nGy/h (평균 132.6 nGy/h)(NIER, 2009), 용인시 원삼지역 100개 암석의 86.5~299.7 nGy/h (평균 174.6 nGy/h)보다는 높다.

지질별 평균 흡수선량은 og2에서 가장 높은 233.3 nGy/h (중앙값 198.1 nGy/h)이었고 다음으로는 og4의 210.7 nGy/h 이었다. 화성암, og3, og1의 평균 흡수선량은 각각 191.4 nGy/h, 169.1 nGy/h, 166.3 nGy/h이었다(Fig. 6). 연구지역의 흡수선량 최고치는 og2의 1,714.5 nGy/h인데 이는 청천면 덕평리 일대 탄질세일에 국부적으로 함유된 우라늄 이상대(Kim, 1989; Shin and Kim, 2011) 때문으로 판단된다.

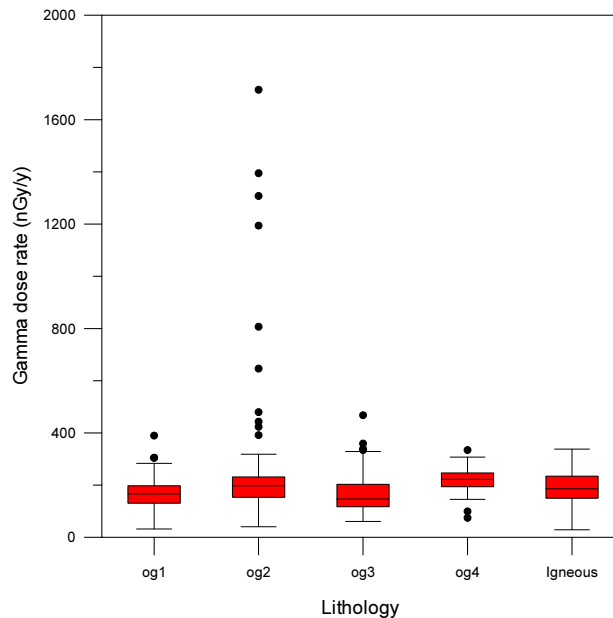


Fig. 6. Box plots showing gamma dose rate (nGy/y) for five geological units.

### 지질대별 옥외 유효선량

421개 지점의 지표방사능으로부터 환산된 흡수선량을 연간 옥외 유효선량으로의 환산하였고(UNSCEAR, 2000), 이를 5개 지질대별로 정리한 것은 Table 3에서 보는 바와 같다. 연구지역 421개 지점 최저 옥외 유효선량은 og1의 0.04 mSv/y 이고, 최고 옥외 유효선량은 og2의 2.10 mSv/y이었으며 평균은 0.24 mSv/y이다. 연구지역의 옥외 유효선량은 og1, og2, og3, 백악기화강암으로 이루어진 괴산군 청천지역 77개 지점의 평균 옥외 유효선량인 0.28 mSv/y (Yun and Cho, 2019) 보다 약간 낮다. 그러나 세계 평균으로 알려진 0.07 mSv/y (UNSCEAR, 1982), 대전시 유성지역 46개 암석의 0.06~0.20 mSv/y (평균 0.11 mSv/y)(NIER, 2008), 양평군 양동지역 72개 암석의 0.06~0.22 mSv/y (평균 0.13 mSv/y)보다는 높다 (NIER, 2009). 또한 연구지역의 옥외 유효선량은 대전 유성구 충남대 일부 지점에서 측정된 옥외 유효선량 0.11 mSv/y (Jun et al., 1990)보다도 높게 나타났다.

전체적으로 보면 지질별 옥외 유효선량에는 큰 차이가 없는 편이나(Fig. 7) og2의 옥외 유효선량이 가장 높은 0.05~2.10 mSv/y (평균 0.29 mSv/y, 중앙값 0.24 mSv/y)의 범위를 보인다. 다음으로는 og4의 0.09~0.41 mSv/y (평균 0.26 mSv/y) 이고, 화성암, og1, og3의 옥외 유효선량은 각각 0.04~0.42 mSv/y (평균 0.24 mSv/y), 0.04~0.48 mSv/y (평균 0.20 mSv/y), 0.07~0.57 mSv/y (평균 0.21 mSv/y)이다(Table 3). 연구지역 421개 지점 중에서 일반인의 옥외 유효선량 한도인 1 mSv/y (ICRP, 1991)를 초과하는 지점은 4개 지점이다. 이들은 금산의 1.78 mSv/y, 괴산의 1.24 mSv/y, 1.45 mSv/y, 보은의 1.36 mSv/y로 모두 함 우라늄층이 협재하는 og2에 위치한다.

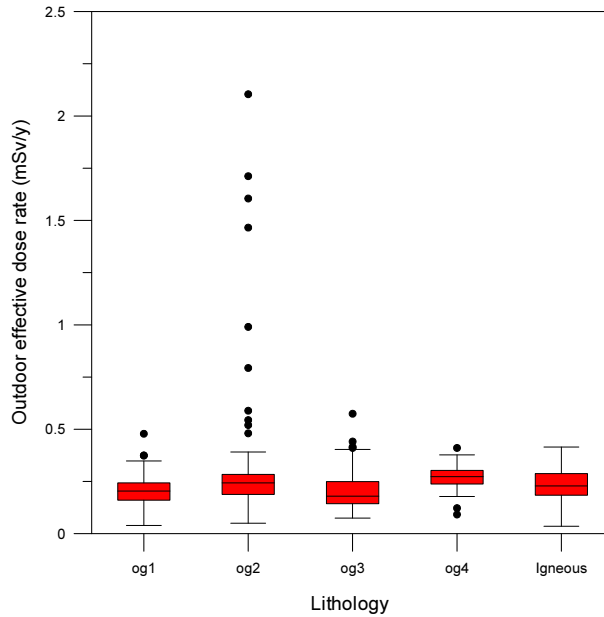


Fig. 7. Box plots showing outdoor effective dose rate (mSv/y) for five geological units.

## 결론

함 우라늄 탄층이 협재하는 것으로 알려진 옥천층군의 유효선량을 파악하기 위하여 옥천층군을 og1, og2, og3, og4, 화성암의 5개의 지질로 나누고 421개 암석 노두에서 휴대용 감마선분광분석기로 지표방사능을 측정하였다. 연구지역의 지표방사능은 국내 다른 지역보다(대전, 양평, 괴산, 용인) 다소 높게 나타났으며 5개 지질별 평균 40K, eU, eTh 함량에는 큰 차이가 없었다. 지표방사능을 방사능강도로 환산하면 og2의 일부 고 우라늄 지점을 제외하면 40K가 방사능강도에 절대적인 영향을 미친다. 5개 지질별 방사능강도에는 큰 차이가 없었으며 전체적으로 국내 다른 지역(대전, 양평, 용인)에 비해서 방사능강도가 높은 것으로 나타난다. 40K, eU, eTh의 방사능강도로부터 구한 연구지역 흡수선량의 범위는 28.84~1,714.5 nGy/h인데 5개 지질별 흡수선량에는 큰 차이가 없었다. 흡수선량에 기여하는 정도는 eTh가 40.4%, K가 34.7%, eU이 24.9%로 세계 평균과 비슷한 것으로 나타났다. 연구지역의 흡수선량으로부터 구한 옥외 유효선량은 0.04~2.10 mSv/y (평균 0.24 mSv/y)인데 하부천매암층내(og2)의 함 우라늄 층에 위치한 4개 지점을 제외한 나머지 대부분의 옥외 유효선량은 정상적인 배경치인 1 mSv/y보다 낮은 것으로 나타났다.

## 사사

이 연구는 한국지질자원연구원의 2020년 ‘기후변화대응 대응량 지하수확보 및 최적활용 기술’ 개발의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

Alomari, A.H., Saleh, M.A., Hasim, S., Alsayaheen, A., 2019, Investigation of natural gamma radiation dose rate (GDR) levels and its relationship with soil type and underlying geological formations in Jordan, Journal of African Earth

Sciences, 155, 32-42.

- Cho, B.W., 2017, Uranium concentrations in groundwater of the Goesan area, Korea, *Economic and Environmental Geology*, 50(5), 353-361 (in Korean with English abstract).
- IAEA (International Atomic Energy Agency), 2003, Radiation protection and the management of radioactive waste in the oil and gas industry, International Atomic Energy Agency, 173p.
- ICRP (International Commission on Radiological Protection), 1991, 1990-1991 recommendations of the ICRP, New York, Pergamon Press, Publication 60, ICRP 21, 1-3.
- Jun, J.S., Oh, H.P., Ha, C.W., 1990, Study on the dosimetry and assessment of terrestrial radiation exposure, *Journal of Radiation Protection and Research*, 15(2), 87-100 (in Korean with English abstract).
- Kávási, N., Somlai, J., Szeiler, G., Szabó, B., Schafer, I., Kovács, T., 2010, Estimation of effective doses to cavers based on radon measurements carried out in seven caves of the Bakony Mountains in Hungary, *Radiation Measurements*, 45(9), 1068-1071.
- Kim, J.H., 1989, Geochemistry and genesis of the Guryongsan (Ogcheon) uraniumiferous black slate, *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 22(1), 35-63 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.J., Kim, S.Y., Lee, J.I., Kim, J.L., Chang, I., Hong, D.C., 2013, Environmental gamma-ray dose rate measurement by using, high sensitivity  $\text{LiF:Mg, Cu, Si}$  TLD, *Radiation Measurements*, 56, 248-251.
- KINS (Korea Institute of Nuclear Safety), 2006, Environmental radioactivity survey data in Korea, KINS/ER-028, 38, 273p (in Korean with English abstract).
- NIER (National Institute of Environmental Research), 2008, Study on the naturally occurring radionuclides in groundwater ( I ), KIGAM, 293p (in Korean with English abstract).
- NIER (National Institute of Environmental Research), 2009, Study on the naturally occurring radionuclides in groundwater ( II ), KIGAM, 279p (in Korean with English abstract).
- NIER (National Institute of Environmental Research), 2012, Study on the naturally occurring radionuclides in groundwater of high potential area, KIGAM, NIER-SP2012-373, 245p (in Korean with English abstract).
- NIER (National Institute of Environmental Research), 2013, Studies on the naturally occurring radionuclides in groundwater of the Youngin high potential area, KIGAM, NIER-SP2013-416, 220p (in Korean with English abstract).
- Shin, D.B., Kim, S.J., 2011, Geochemical characteristics of black slate and coaly slate from the uranium deposit in Deokpyeong area, *Economic and Environmental Geology*, 44(5), 373-386 (in Korean with English abstract).
- Siegel, M.D., Bryan, C.R., 2003, Environmental geochemistry of radioactive contamination, *Treatise on Geochemistry*, Sandia Report, Sand 2003-2063, 114p.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 1982, Exposures resulting from nuclear explosions, Annex E: United Nations, New York, 248p.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 1993, Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York, 920p.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 2000, Exposure from natural radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to general assembly, Annex B, United Nations, New York, 76p.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 2008, Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the general assembly with scientific Annexes, United Nations, New York, 219p.
- Yun, U., Cho, B.W., 2019, Assessment of gamma-radiation dose rate in the Ogcheon lower phyllite area, Goesan county, Korea, using gamma-ray spectrometry, *Journal of Engineering Geology*, 29(4), 461-468 (in Korean with English abstract).