

# 감마선분광분석기를 이용한 괴산 옥천하부천매암대 일대의 감마선량 평가

윤 옥 · 조병욱\*

한국지질자원연구원 지하수연구센터 책임연구원

## Assessment of Gamma-radiation dose Rate in the Ogcheon Lower Phyllite Area, Goesan County, Korea, Using Gamma-ray Spectrometry

Uk Yun · Byong-Wook Cho\*

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

### Abstract

Gamma-radiation dose rates were measured at 77 points around the Ogcheon lower phyllite zone (og2) in Goesan County, Korea, using gamma-ray spectrometry. Sample K contents were in the range 1.8-8.8% (average 4.6%), highest in Kgr. The eU contents were 0.2-217.9 ppm (average 16.7 ppm), highest in og2 (median 29.6 ppm). The eTh contents were 11.9-76.5 ppm (average 29.5 ppm) and the average eTh content of Kgr was 45.4 ppm, higher than those of Ogcheon meta-sedimentary rocks (og1, og2, and og3) (26.6-30.6 ppm). Except for some high-uranium sites in og2,  $^{40}\text{K}$  is the main radioactive material contributing to the gamma-radiation dose in the study area. Our results indicate that the outdoor effective dose rate of the area is 0.08-1.71 mSv  $\text{y}^{-1}$  (average 0.28 mSv  $\text{y}^{-1}$ ), with most areas apart from three points in og2 displaying dose rates  $<1$  mSv  $\text{y}^{-1}$ , which is the normal natural radiation background level.

**Keywords:** gamma-ray spectrometry, Ogcheon lower phyllite zone, gamma-radiation dose rate, effective dose rate

### 초 록

휴대용 감마선분광분석기를 이용하여 괴산지역 옥천하부천매암대(og2) 주변 일대 77개 지점에서 감마선량을 측정하였다. 전체 시료의  $^{40}\text{K}$  함량은 1.8-8.8% 범위(평균 4.6%)로 Kgr에서 함량이 가장 높았으며, eU의 함량 범위는 0.2-217.9 ppm (평균 16.7 ppm)인데 og2에서 가장 높았으며(중앙값 29.6 ppm)다. eTh의 함량 범위는 11.9-76.5 ppm (평균 29.5 ppm) 이었는데 Kgr의 평균 함량은 45.4 ppm으로 og1, og2, og3의 함량(26.6-30.6 ppm)보다 높았다. og2에 속하는 일부 고 우라늄 지점을 제외한 연구지역의 감마선량에 기여하는 방사성물질은  $^{40}\text{K}$ 가 절대적이다. 연구지역의 옥외 유효선량률은 0.08-1.71 mSv/y (평균 0.28 mSv/y)의 범위로 나타났다. 유효선량률이 1 mSv를 넘는 지점은 함 우라늄 층이 협재된 og2의 덕평리지역 3지점이며 이를 제외한 나머지 대부분 지역은 정상적인 자연방사선지역에 해당한다.

**주요어:** 감마선분광분석기, 옥천하부천매암대, 감마선량, 유효선량률

### OPEN ACCESS

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

Received: 31 October, 2019  
Accepted: 3 December, 2019

© 2019 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

방사선의 인체 노출 평가에 있어서 지표 근처 대기의 감마선량 측정은 중요하다. 감마선량 측정은 크게 보아 열형광선량계(Thermoluminescence dosimetry, TLD) 등에 의한 직접 측정 방법과 감마선분광분석기(Gamma-ray spectrometry) 등에 의한 간접적인 측정방법으로 나눌 수 있다(Kim et al., 2013). 감마선은 주로 암석내 우라늄, 토륨, 포타슘 등의 함량에 좌우되는데 야외 활동을 하는 사람은 지표 하 30 cm 내의 토양이나 암석으로부터 유래하는 감마선에 노출되어 있다.

자연방사선 피폭량의 세계 평균은 2.4 mSv 정도로 인체에 미치는 위해성은 미약한 것으로 알려져 있으나(UNSCEAR, 1993) 저 농도의 자연방사능이라도 장기간 노출되면 폐암, 골수암 및 면역체계 감퇴 등 질병유발 가능성이 높아진다(UNSCEAR, 2008). 자연방사선은 크게 우주방사선과 지각방사선으로 나눌 수 있다. 지각방사선은 주로 암석내 방사성 물질과 라돈에 의하나 야외에서의 라돈의 기여는 거의 없는 것으로 보고되고 있다(Kavási et al., 2010).

연구지역은 괴산군 중에서 암석 내 우라늄 함량이 높은 지층이 협재하고 있는 것으로 알려진 옥천대 하부천매암층(og2) 일대이다. 이 지역은 1972년부터 1986년까지 우라늄 광상 확보를 위해 항공 및 차량방사능 광역탐사, 정밀 지하화 탐사, 시추 탐사가 한국지질자원연구소에 의해 수행된 바 있으며 og2에 협재된 일부 탄질점판암(청천면 덕평리 등)의 우라늄 함량은 최고 294 ppm (Kim, 1989), 360 ppm (Shin and Kim, 2011) 등으로 보고되고 있다. 한편 괴산군의 og2와 인접한 백악기화강암(Kgr) 지하수의 우라늄과 라돈 함량은 국내 다른 지역의 함량보다도 높은 것으로 보고되고 있다(Cho, 2017). 국내에서 지각방사능에 의한 감마선량 연구로는 대전 충남대학교와 괴산 덕평리의 일부 지점의 피폭선량 측정(Jun et al., 1990) 등이 있으나 본 연구와 같이 일정한 지역을 대상으로 하지는 않았다. 본 연구는 괴산군 og2 일대 암석의 감마선량을 측정하여 연간 옥외유효선량을 파악함에 있다. 이를 위하여 감마선분광분석기를 이용하여 77개 지점 암석의 지각방사능강도(<sup>40</sup>K, eU, eTh)를 측정하여 감마선량으로 환산하였다.

## 지형 및 지질

괴산지역의 지형고도는 100~900 m 정도인데 남동쪽이 높고 북서쪽으로 갈수록 지형고도가 낮아진다. 괴산지역은 지구 조적으로 경기육괴 중부 남단에 위치하며 크게 보아 시대미상의 옥천층군과 중생대의 화강암류로 구분이 된다(Fig. 1a).

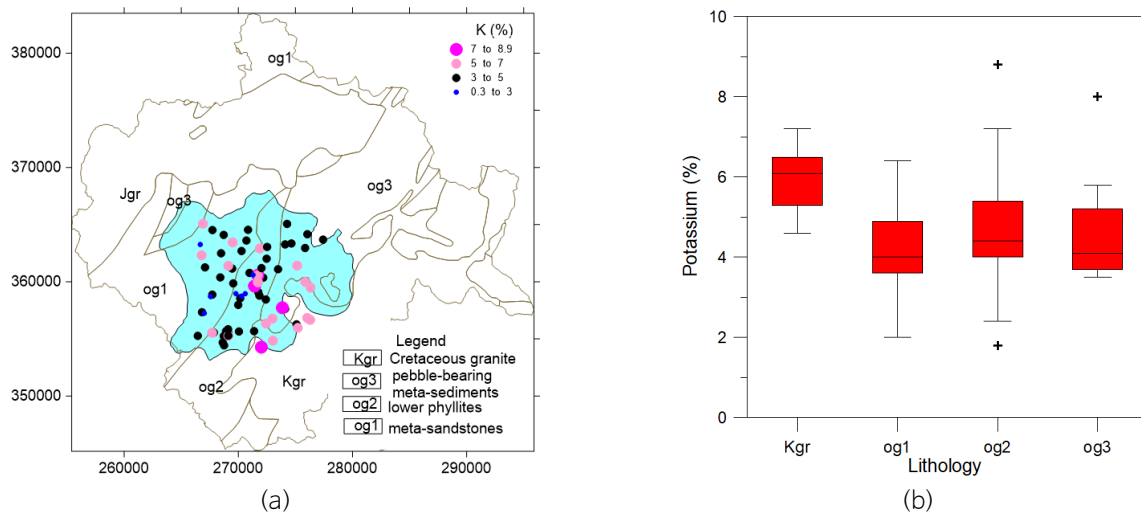


Fig. 1. (a) Spatial distribution of <sup>40</sup>K (%) concentrations. (b) Box plots showing <sup>40</sup>K (%) concentrations of each geology.

옥천층군은 시대미상으로 하부로부터 변성사질암대(og1), 하부천매암대(og2), 함력천매암대(og3)로 구분이 된다. og1은 사질기원의 운모편암과 사질천매암으로 구성되며 규암 및 석회암이 협재한다. 그 상위층인 og2는 천매암, 점판암으로 구성되는데 일부지역에서는 함 우라늄 탄질세일이 협재하는 것으로 알려져 있다(Shin and Kim, 2011). og3는 다양한 종류의 역을 가지는 함력변성퇴적암이다.

화강암류는 연구지역 북서측에 분포하는 주라기 화강암류(Jgr)와 남동부에 분포하는 백악기화강암(Kgr)으로 구분이 된다. Jgr은 화강섬록암과 조립질의 반상화강암으로 구성되는데 중립질의 각섬석, 흑운모등의 유색광물 함량이 높고 석영의 양이 적은 특징을 보인다. Kgr은 거정질의 흑운모화강암, 조립질의 우백질 반상화강암과 세립질의 화강반암으로 구성된다.

## 연구방법

감마선의 기원은 암석 내 자연방사성물질이기 때문에 휴대용 감마선분광분석기를 사용하여 연구지역내 77개 지점 암석의  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  함량을 측정하였다. 측정된 지역은 og2를 중심으로 한 220 km<sup>2</sup> 정도인데 og1, og3, Kgr도 일부 포함된다. 측정 방법은 검출기(probe)를 암석 노두에 직각으로 밀착시킨 다음 300초간 측정하였다. 측정에 이용된 기기(GR-320A enviSPEC device, SAIC, Fugro Instruments, Australia)의 측정 오차범위는 0.1% 내외이다.  $^{40}\text{K}$ 는  $^{40}\text{K}$ 의 농도를 % 단위로 직접 측정하며, eU는 함량의 등가U 농도로서  $^{214}\text{Bi}$ 를 직접 측정하여 U 농도를 간접적으로 알 수 있다. eTh는 함량의 등가 Th 농도로서  $^{208}\text{Ti}$ 를 직접 측정하여 간접적으로 Th 농도를 측정한다.

77개 지점에서 측정된  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  함량을 이용하여 흡수선량을 구하였으며 다시 연간 옥외 유효선량을 계산하였다.

## 결과 및 토의

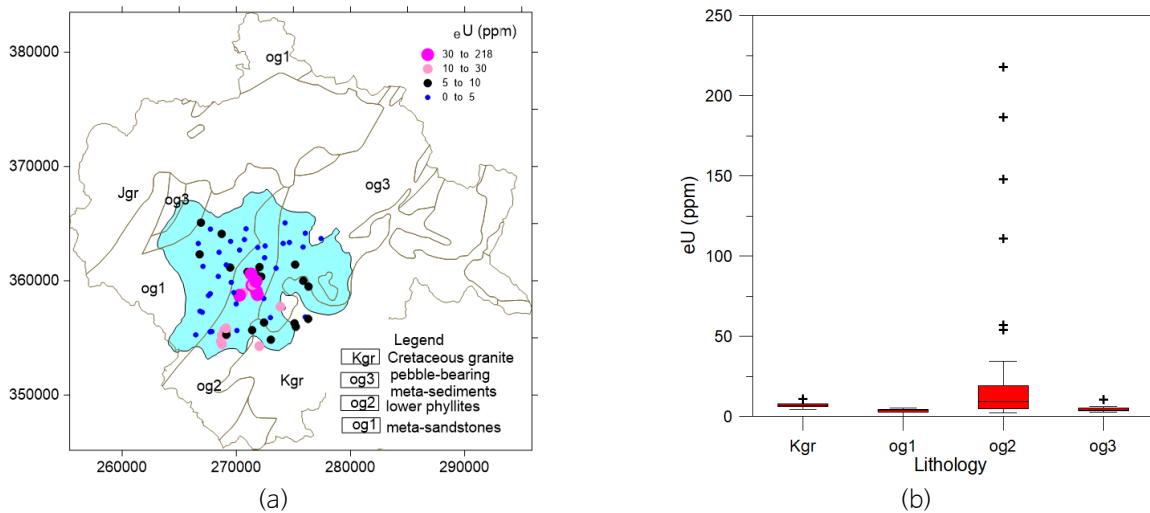
### 휴대용 감마선분광분석기에 의한 지질별 감마선량

감마선분광분석기를 이용하여 77개 지점 암석에서 지각방사능을 측정하였는데 가능한 한 암석 노두에서 측정하였으나 노두가 없을 경우에는 토양에서도 지각방사능을 측정하였다. 지질별 암석의 지각방사능 정도는 Table 1과 같다. 77개 전체 암석의  $^{40}\text{K}$  함량 분포는 Fig. 1a와 같다. 지질별  $^{40}\text{K}$ 의 함량은 Kgr에서 가장 높아서 4.6~7.2% (평균 5.8%)의 범위를 보이며 og1은 2.0~6.4% (평균 4.2%)의 범위를 보인다. og2의  $^{40}\text{K}$  함량은 1.8~8.8% (평균 4.6%), og3는 3.5~8.0% (평균, 4.7%)의 범위를 보인다(Fig. 1b). 연구지역 전체  $^{40}\text{K}$ 의 평균 함량은 4.6%로서 본 연구의 4개 지질뿐만 아니라 Jgr도 포함된 괴산군 전체 200개 암석의 평균 함량인 3.7% (NIER, 2012)보다 약간 높다.

77개 지점의 eU 함량 분포는 Fig. 2a와 같으며 지질별 함량은 og2의 2.4~217.9 ppm (중앙값 9.4 ppm)으로 가장 높다. 다음으로는 Kgr이 높아서 4.6~10.9 ppm (평균 7.0 ppm)의 범위를 보이는데 이 함량은 괴산군 Kgr 지질대 25개 기반암의 eU 평균 함량인 7.5 ppm과 비슷하며(Cho, 2017), 화강암의 평균 우라늄 함량으로 알려진 5.0 ppm (Siegel and Bryan, 2004)보다는 높다. og1과 og3의 eU 함량은 각각 0.2~5.6 ppm (평균 3.8 ppm), 3.0~10.8 ppm (평균 4.3 ppm)의 범위를 보여 Cho(2017)에 의한 43개 og1과 38개 og3의 eU 평균함량 3.60 ppm, 3.26 ppm과 비슷하거나 약간 높다(Fig. 2b). 연구지역 og2의 eU 평균 함량과 중앙값은 각각 29.6 ppm, 9.4 ppm으로 Cho(2017)에 의한 38개 og2의 평균 함량과 중앙값인 4.87 ppm, 3.50 ppm보다 훨씬 높다. 이는 연구지역 og2에서 측정한 지점은 암석 내 우라늄 함량이 높은 청천면 덕평리 일대를 중심으로 하였기 때문으로 판단된다. 연구지역 암석의 eU 함량은 og2, og2와 Kgr의 경계부가 고함량 지역임을 보여준다.

**Table 1.** Statistics of the concentrations of <sup>40</sup>K, eU and eTh in rocks (soils) of each geology

Lithology	No. of samples	Statistics	Elemental concentration		
			<sup>40</sup> K (%)	eU (ppm)	eTh (ppm)
Kgr	9	Min.	4.6	4.6	25.7
		Max.	7.2	10.9	72.4
		Mean	5.8	7.0	45.4
		Med.	6.1	7.0	42.3
og1	20	Min.	2.0	0.2	13.1
		Max.	6.4	5.6	56.6
		Mean	4.2	3.8	26.6
		Med.	4.0	3.95	23.4
og2	37	Min.	1.8	2.4	11.9
		Max.	8.8	217.9	39.5
		Mean	4.6	29.6	27.0
		Med.	1.34	9.4	26.0
og3	11	Min.	3.5	3.0	20.5
		Max.	8.0	10.8	76.5
		Mean	4.7	4.8	30.6
		Med.	4.1	4.3	23.4
Total	77	Min.	1.8	0.2	11.9
		Max.	8.8	217.9	76.5
		Mean	4.6	16.7	29.5
		Med.	4.5	5.3	25.7



**Fig. 2.** (a) Spatial distribution of eU (ppm) concentrations. (b) Box plots showing eU (ppm) concentrations of each geology.

77개 전체의 eTh 함량분포는 Fig. 3a와 같다. 지질별 eTh 함량은 og2는 11.9~39.5 ppm (평균 27.0 ppm)을 보여서 og1의 13.1~56.6 ppm (평균 26.6 ppm), og3의 20.5~76.5 ppm (평균 30.6 ppm)과 비슷하나 Kgr의 25.7~72.4 ppm (평균 45.4

ppm)보다는 낮은 농도를 보인다(Fig. 3b). 연구지역 전체의 eTh 평균 함량은 29.5 ppm으로서 괴산군 200개 기반암의 eTh 평균 함량인 21.7 ppm (NIER, 2012)보다 약간 높다.

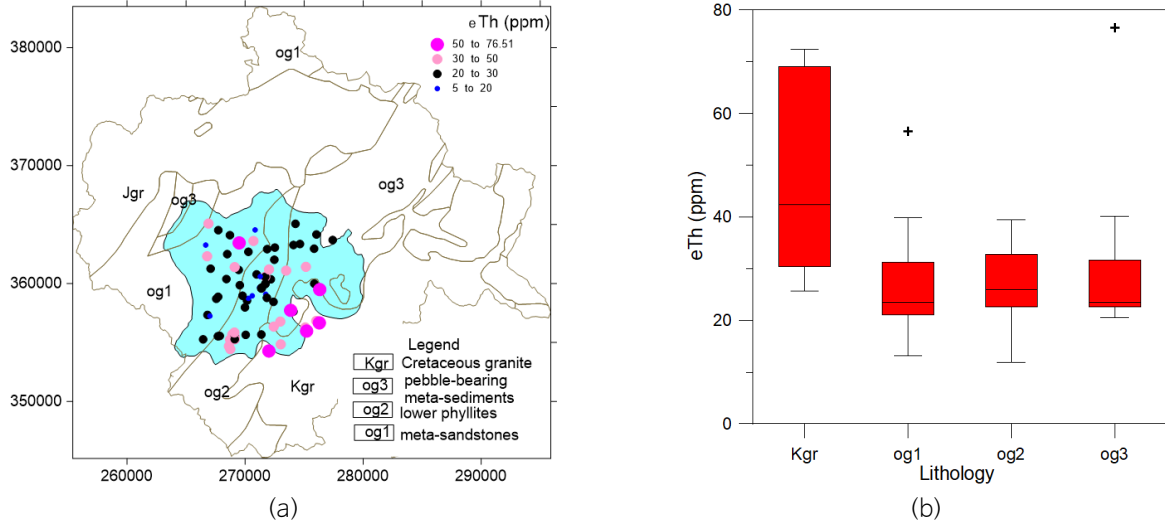


Fig. 3. (a) Spatial distribution of eTh (ppm) concentrations. (b) Box plot showing eTh (ppm) concentrations of each geology.

### 지각방사능의 옥외 연간 유효선량으로의 환산

감마선분광분석기와 열형광선량계로 측정된 감마선량에는 차이가 없는 것으로 보고되고 있기 때문에(Jun et al., 1990; Huang et al., 2016) 감마선분광분석기로 측정된 지각방사능을 옥외 유효선량으로 환산하였다. 일반적으로 사람들은 20%는 옥외 공간, 80%는 실내공간에서 생활한다고 보아 실내는 0.8, 실외는 0.2를 각각 적용한다. 유효선량을 계산하기에 앞서 지각방사능 측정자료를 흡수선량률(Absorbed dose rate)으로 변환하였는데 다음 식 (1)을 이용하였다(UNSCEAR, 2000).

$$D = 0.0417 C_K + 0.462 C_U + 0.621 C_{Th} \quad (1)$$

여기서, D는 흡수선량률(nGy/h),  $C_K$ 는 activity concentration of  $^{40}\text{K}$ ,  $C_U$ 는 activity concentration of  $^{238}\text{U}$ ,  $C_{Th}$ 는 activity concentration of  $^{232}\text{Th}$ 이다.

지각방사능이 측정된 77개 지점의 K (%), U (ppm), Th (ppm)의 농도는 IAEA(2003)에 의해 추천된 다음과 같은 Conversion factor에 의해 Bq/kg으로 환산되었다.

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

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

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

흡수선량률을 연간 유효선량률으로의 환산은 다음 식 (2)와 같다(UNSCEAR, 2000).

$$HE = D \times T \times F \quad (2)$$

여기서, HE는 연간 유효선량률(mSv/y), D는 흡수선량률(nGy/h), T는 연간 실내/옥외 체류시간 0.2 혹은 0.8 \* (24 × 365.25 = 8,760), F는 환산계수( $0.7 \times 10^{-6}$  Sv/Gy)이다.

감마선분광분석기로 암석 및 토양의 <sup>40</sup>K, eU, eTh 함량을 측정된 결과를 이용하여 방사능강도로 변환시킨 후 흡수선량률, 유효선량률을 구한 결과는 Table 2와 같다. 총 77개 <sup>40</sup>K의 함량은 1.8~8.8%, eU의 함량은 0.2~217.9 ppm, eTh의 함량은 11.9~46.5 ppm의 범위인데(Table 1) 이를 비방사능으로 환산하면 <sup>40</sup>K에 의한 방사능강도는 563.4~2,754.4 Bq/kg (평균 1,445.9 Bq/kg), eU의 비방사능은 2.5~2,691.1 Bq/kg (평균, 206.3 Bq/kg), eTh의 비방사능은 48.31~310.6 Bq/kg (평균, 119.9 Bq/kg)를 보인다. 따라서 연구지역의 비방사능에 기여하는 방사성물질은 og2에 속하는 청천면 덕평리의 일부 지점을 제외하고는 <sup>40</sup>K가 절대적이다. <sup>40</sup>K의 경우 단위 방사능 농도당 선량률은 매우 낮은 반면 상대적으로 높은 함량 때문에 전체 유효선량률에 가장 크게 기여하였다.

**Table 2.** Calculated activity concentrations, absorbed and outdoor annual effective dose rates of each geology of the area

Lithology	No. of samples	Statistics	Activity concentration (Bq/kg)			Absorbed dose rate (nGy h <sup>-1</sup> )	Outdoor annual effective dose (mSv/y)
			<sup>40</sup> K	eU	eTh		
Kgr	9	Min.	1,439.8	56.8	104.3	169	0.21
		Max.	2,253.6	134.6	293.9	339	0.42
		Mean	1,825.8	87.0	184.5	231	0.28
		Med.	1,909.3	86.5	171.7	221	0.27
og1	20	Min.	626.0	2.5	53.2	68	0.08
		Max.	2,003.2	69.2	229.8	212	0.26
		Mean	1,305.2	46.7	108.0	143	0.18
		Med.	1,252.0	48.8	95.0	133	0.16
og2	37	Min.	563.4	29.6	48.3	103	0.13
		Max.	2,754.4	2,691.1	160.4	1,394	1.71
		Mean	1,422.9	365.2	109.4	296	0.36
		Med.	1,377.2	116.1	105.6	204	0.25
og3	11	Min.	1,095.5	37.1	83.2	118	0.14
		Max.	2,504.0	133.4	310.6	359	0.44
		Mean	1,468.3	59.6	124.3	166	0.20
		Med.	1,283.3	53.1	95.0	134	0.16
Total	77	Min.	563.4	2.5	48.3	68	0.08
		Max.	2,754.4	2,691.1	310.6	1,394	1.71
		Mean	1,445.9	206.3	119.9	230	0.28
		Med.	1,408.5	65.5	104.3	166	0.20

위의 3개 방사능강도로부터 구한 흡수선량률의 범위는 68~1,394 nGy/h의 범위이다. 지질별 흡수선량률은 Kgr은 169~339 nGy/h (평균 231 nGy/h), og1은 68~212 nGy/h (평균 143 nGy/h), og2는 103~1,394 nGy/h (평균 296 nGy/h), og3는 118~359 nGy/h (평균 166 nGy/h)이다. 최고 흡수선량률은 og2의 1,394 nGy/h이나 중앙값으로만 보았을 때는 Kgr



이 221 nGy/h로 og2의 204 nGy/h보다 높고, og1과 og3는 각각 133 nGy/h, 134 nGy/h로 가장 낮다(Table 2).

지질별 옥외 유효선량률을 보면 Kgr은 0.21~0.42 mSv/y (평균 0.28 mSv/y), og1은 0.08~0.26 mSv/y (평균 0.18 mSv/y), og2는 0.13~1.71 mSv/y (평균 0.36 mSv/y), og3는 0.14~0.44 mSv/y (평균 0.20 mSv/y)의 범위를 보인다(Table 2). 최고 유효선량률은 og2의 1.71 mSv/y이다. 연구지역의 옥외 유효선량률은 0.08~1.71 mSv/y의 범위(평균 0.28 mSv/y)로 나타나 세계 평균인 0.07 mSv/y (UNSCEAR, 2000)보다는 높으나 대전지역 지각방사능에 의한 유효선량률 0.56 mSv/y보다는 낮다(Jun et al., 1990). 이는 연구지역의 대부분이 변성퇴적암으로 구성되어 있는 반면에 대전지역의 감마선 측정지점은 주라기화강암에 위치하고 있기 때문으로 판단된다. 연구지역의 옥외 유효선량률은 함 우라늄층이 협재하는 og2의 덕평리 지역 3개소만 1 mSv/y를 넘고 있으나 나머지 대부분의 지역은 정상적인 자연방사선지역에 해당한다(Fig. 4).

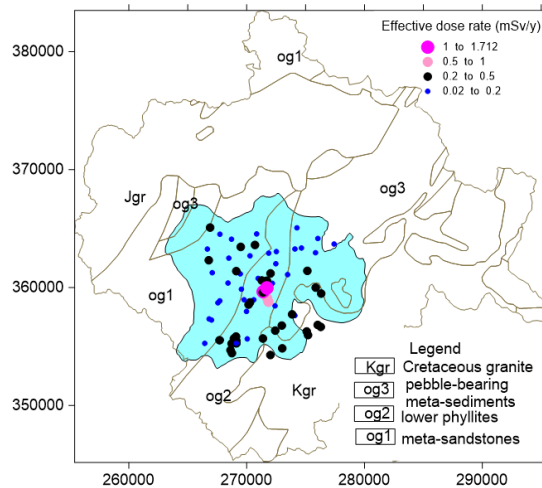


Fig. 4. Spatial distribution of outdoor effective dose rate of the area.

## 결론

일부 지층내 우라늄 함량이 높은 괴산지역 하부천매암대(og2) 일대를 중심으로 77개 암석 노두에서 감마선분광분석기로 지각방사능을 측정된 결과 지질별 암석내 <sup>40</sup>K 함량은 Kgr에서 평균 5.8%로 가장 높았으며, eU 함량은 og2에서 중앙값 9.4 ppm으로 가장 높고 다음으로는 Kgr이 높았다. 지질별 eTh 함량은 og1, og2, og3의 함량은 26.6-30.6 ppm이나 Kgr의 함량은 이들보다 높은 45.4 ppm을 보인다. 연구지역의 비방사능에 기여하는 순위는 og2에 속하는 일부 고 우라늄 지점을 제외하고는 <sup>40</sup>K가 절대적이다. <sup>40</sup>K, eU, eTh의 비방사능으로부터 구한 흡수선량률의 범위는 68~1,394 nGy/h의 범위이고 이로부터 구한 옥외 유효선량률은 0.08~1.71 mSv/y (평균, 0.28 mSv/y)이다. 연구지역의 하부천매암층내 함 우라늄층이 협재하는 덕평리 일대의 유효선량률은 1 mSv/y을 넘는 것으로 나타났으나 나머지 대부분 지역은 1 mSv/y보다 낮은 정상 배경치의 범위로 나타났다.

## 사사

본 연구는 한국지질자원연구원의 2019년 ‘기후변화대응 지하수/지열 자원 확보 및 생태보전 융합기술(Terra-4G)’ 개발의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

- Cho, B.W., 2017, Uranium concentration in groundwater of the Goesan area, Korea, *Economic and Environmental Geology*, 50(5), 353-361 (in Korean with English abstract).
- Huang, Y.J., Guo, G.Y., He, Y., Yang, L.T., Shan, Z., Chen, C.F., Shang-Guan, Z.H., 2016, A comparative study of terrestrial gamma dose rate in air measured by thermoluminescent dosimeter, portable survey meter and HPGe gamma spectrometer, *Journal of Environmental Radioactivity*, 164, 13-18.
- IAEA (International Atomic Energy Agency), 2003, Radiation protection and the management of radioactive waste in the oil and gas industry, *Safety Reports Series No. 34*, 130p.
- 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) uraniferous 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 LiF:Mg,Cu,Si TLD, *Radiation Measurements*, 56, 248-251.
- NIER (National Institute of Environmental Research), 2012, Study on the naturally occurring radionuclides in groundwater of high potential area, KIGAM, NIER-SP2012-373, 245p.
- 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.
- Siegel, M.D., Bryan, C.R., 2004, Environmental geochemistry of radioactive contamination, treatise on geochemistry, Sandia Report, Sand2003-2063, 114p.
- UNSCEAR (The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 1993, Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on Effects of Ionizing Radiation (UNSCEAR), United Nations, New York, 920p.
- UNSCEAR (The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 2000, Exposure from natural radiation, United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), Report to General Assembly, Annex B, United Nations, New York, 76p.
- UNSCEAR (The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 2008, Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York, 219p.