

<원저>

먹는 샘물의 방사성물질 측정 및 유해성 평가

조정원¹⁾·이상복^{2,3)}·남조현¹⁾·노은정¹⁾·백현우¹⁾·이예진¹⁾·이준세¹⁾·최지원¹⁾·김성철^{1,2)}¹⁾가천대학교 방사선학과·²⁾가천대학교 일반대학원·³⁾선광티앤에스 방사능시험분석센터

Evaluation of Radioactive Substance and Measurement of Harmfulness in Drinking Water

Jungwon Jo¹⁾·Sangbok Lee^{2,3)}·Johyeon Nam¹⁾·Eunjeong Noh¹⁾·Hyunwoo Beak¹⁾·Yejin Lee¹⁾Joonse Lee¹⁾·Jiwon Choi¹⁾·Sungchul Kim^{1,2)}¹⁾Department of Radiological Science, Gachon University²⁾Department of Health Science, Gachon University Graduate School³⁾Department of Radioactivity Test & Analysis Center, Sunkwang T&S

Abstract As the number of single-person households increases, the consumption of bottled water is increasing. In addition, as the public's interest in radioactivity increases, interest in the field of living radioactivity is also increasing. Since drinking water is an essential element in our daily life, it must be safe from radioactivity. In this study, gamma radiation of drinking spring water was measured and internal exposure dose evaluation was performed to determine its harmfulness. K-40 and uranium-based radioactivity analysis was performed through a high-purity germanium detector, and as a result, drinking water was detected somewhat higher than that of mixing water. Since there is no regulation on the natural radioactivity concentration in Korea, it was compared with the U.S. Environmental Protection Agency Drinking Water Regulations and World Health Organization standard. As a result, there were some items that exceeded standards. Internal exposure was evaluated according to the effective dose formula of ICRP 119. As the result was derived that a maximum of 1.17 mSv per year could be received, This result means that the dose limit for the general public may be exceeded, and it was judged that it is necessary to set an appropriate standard value and present a recommendation value through continuous monitoring in the future.

Key Words: Drinking water, U-238, High Purity Germanium detector, Radioactivity, Water quality standard

중심 단어: 먹는 샘물, 우라늄-238, 고순도게르마늄검출기, 방사능, 수질 기준

1. 서론

후쿠시마 원전사고 이후, 방사능에 대한 관심도는 급속도로 증가하였다. 기존에는 방사성물질 오염이 주 관심이었으나 최근에는 생활방사선 분야에 대한 관심도가 증가한 것이다. 침대 매트리스에서의 라돈 검출사건, 아파트 내 실내 라돈 검출로 인한 규제지침 마련 등은 이러한 관심도를 말하여 주고 있다. 더불어 어패류, 생선 등을 포함한 식자제와 수분공급에 필수적인 먹는 물에도 관심이 증가되고 있다.

현재 우리나라는 저출산 시대로 진입과 함께 핵가족화로 생활형태가 변화하고 있다. 1인 가구의 증가로 인해 편의성과 접근성이 높은 생수의 소비량도 지속적으로 증가하고 있다. 먹는 물은 사람이 살아가는데 반드시 필요한 것으로 건강한 삶을 위해서는 하루에 2 L 이상의 물을 섭취하도록 권장하고 있다. 이와 관련하여 식품의약품안전처에서는 2015년에 국내 수질기준 검사항목에 우라늄을 추가하여 관리한다는 지침을 마련하였고, 2017년에는 이 지침에 의해 제조된 생수 중 일부가 우라늄에 대한 권고 수치를 넘어 화

Corresponding author: Sungchul Kim, Department of Radiological Science, Gachon University, 191, Hambangmoe-ro, Yeonsu-gu, Incheon, Korea, 21936, Republic of Korea / Tel: +82-32-820-4364 / E-mail: ksc@gachon.ac.kr

Received 20 June 2021; Revised 26 June 2021; Accepted 28 June 2021

Copyright ©2021 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

제가 되기도 하였다. 미국 환경보호청(U.S. Environmental Protection Agency; EPA)에서는 우리나라의 자핵종인 Ra-226에 대한 기준치를 초과하는 물을 수년간 음용 시에는 폐암 등 발암물질이 될 수 있다는 가능성을 제시하였고, 이에 따라 그 권고치를 0.74 Bq/L로 규정하고 있다[1]. 마찬가지로 세계보건기구(World Health Organization; WHO)에서는 Ra-226의 권고치를 1 Bq/L로 규정하고 있다[2].

한편, 우리나라의 먹는 물에 관한 연구는 대부분 지하수의 방사능에 대한 연구사례이고 음용에 직결되는 생수에 관련된 연구는 미생물과 성분 분석이 대부분이면서도, 방사능 측정에 대해서는 Cs-137, Sr-90, H-3 항목에만 국한되어 있다[3]. 이는 먹는 생수에만 해당하는 것으로 음료 등을 제조할 때 사용되는 혼합 음료의 경우에는 이보다도 대폭 축소되어 8가지의 화학적 수질 검사만을 이행하고 있고, 방사능 검사를 실시하지 않고 있다.

본 연구에서는 생수를 포함한 먹는 샘물에 함유된 방사능 분석을 수행하고, Ra-226 등 자연방사능에 대한 그 위해 정도를 산정하여 평가함으로써 향후 우리나라의 방사능 검사항목의 적절한 기준치를 마련할 수 있는 기초 자료를 확보하는 것을 목표로 하였다.

II. 재료 및 측정장비

1. 먹는 물의 재료선정

연구를 위해 확보한 시료는 생수 9종과 혼합음료 4종으로 총 13종의 먹는 샘물을 대상으로 하였으며, 수원지가 외국인 2개의 생수가 포함되었다(Table 1).

여러 종류의 생수 중 다른 지역에 비해 높은 방사능을 포함하고 있어 과거에 방사능 수치를 초과한 이력이 있는 지역이나 구체적으로 인한 가축 사체 분해물지와 근접한 수원 지역 등을 우선적으로 고려하여 먹는 샘물을 최종 선정하였다. 또한, 호주와 캐나다의 외국 생수 2종과 음료수 등에 사

용되는 혼합 음료 4종을 선정하여 방사능 수치 및 그 위해성을 비교할 수 있는 기준 지표로 활용하고자 하였다.

2. 방사능 측정장비

본 연구의 방사능 측정 장비는 고순도게르마늄검출기(HPGe, P-type coaxial Detector)로 검출기의 효율은 3"×3" (NaI) 기준 약 30%의 상대효율을 가진 검출기이다. 이는 핵종 분석을 정밀하게 할 수 있고, 분해능이 뛰어나 핵종으로부터의 γ 선의 측정과 선량, 에너지, 파고 분석이 가능하다는 장점을 가지고 있다[4, 5]. 구체적인 장비의 사양은 Fig. 1에 나타내었다. 측정 장비는 유효기간 내 인증표준 물질로 자체 교정된 검출기를 사용하였고, 스펙트럼에 대한 분석 프로그램은 Genie 2000 basic을 사용하였다.

3. 분석방법

본 연구에서의 관심핵종은 Table 2에 나타내었다. 감마 방사능 분석을 위해 관심핵종 중 U-238 계열에서 안정된 원소로 붕괴하는 과정 중 발생하는 Bi-214와 Pb-214의 측정을 통해 그 위해성을 알아보았다[6]. 이는 방사평형을 통해 우리나라의 Ra-226 영속평형 관계에 있는 감마선 분석이 가능한 Bi-214와 Pb-214를 측정하여 이를 추정할 수 있는 간접 추정방식으로 하였다[7].

연구에 사용된 Marinelli Beaker는 원통형 모양으로 방사능 측정 시 검출기 표면적을 높여 높은 기하학적 검출효율성을 얻을 수 있다[8]. 본 연구에서는 용량 1 L 기준의 Beaker [9]를 사용하였다. 13개의 시료를 각각 Marinelli Beaker에 1L 채운 후 정확한 측정을 위해 상면이 수평이 되도록 측정 용기에 압축하여 기포를 제거하였다. Ra-226의 방사평형 조건을 만족시키기 위해서는 약 21일 이상의 안정화 시간이 필요하므로 확보한 시료를 2021년 04월 21일에 Marinelli Beaker에 장입 및 공기가 새어나가지 않게 파라핀 테이프로 비커의 입구를 밀봉한 후 안정화시켜 동년 05

Table 1. Water Measurement Sample

Type	Product	Source	Type	Product	Source
Drinking water	A	Chungnam	Drinking water	H	Australia
	B	Jeonnam		I	Canada
	C	Gyeonggi		J	Jeju
	D	Gyeonggi	Mixing	K	Jeju
	E	Chungbuk		L	Chungbuk
	F	Chungbuk		M	Gyeongbuk
	G	Gyeongbuk			



Category	Specification
Detector Model	GC3018
Preamplifier Model	iPA-SL10
Type	STD Ptype Coaxial Detector
Efficiency	≥30%
Resolution	≤1.8keV FWHM @ 1.33MeV
Diameter	62mm
Length/Thickness	40mm
Window Thickness	1.5mm
Window Material	Aluminum

Fig. 1. HPGe Detector Specification

Table 2. Target Nuclide Property (Natural Radionuclide)

Nuclide	Half life	Energy(방출률)
⁴⁰ K	12.5×10 ⁹ year	1460.82 keV, (10 %)
		609.31 keV, (46.45 %)
²¹⁴ Bi	19.7 min	1120.29 keV, (15.14 %)
		1764.49 keV, (15.39 %)
²¹⁴ Pb	26.8 min	351.93 keV, (46.96 %)
		295.22 keV, (27.29 %)

월 20일부터 방사능 측정을 시작하였다[10,11]. 시료의 측정은 한국원자력안전기술원 환경방사능조사 방법에 따라 10,000초로 측정하였다[12].

측정한 방사능 농도를 활용하여 일반인에 대한 내부피폭 선량평가를 실시하였다. 내부피폭선량평가는 ICRP 119에서 제시하는 유효선량 평가모델을 기반으로 하였으며, 내부피

폭 선량평가 모델은 식 1과 같다[13]. 여기서 먹는 샘물의 섭취는 세계보건기구에서 권장하는 1일 당 2 L를 기준으로 하였고, 1년을 기준으로 섭취 선량계수는 권고사항대로 0.045 μSv 값을 적용하여 평가하였다.

$$Committed\ Effective\ Dose = C \times IR \times EF \times IDC \quad \text{식(1)}$$

단, Committed Effective Dose : 조직, 기관에 대한 유효선량 (mSv/yr)

C : 방사성물질 농도 (Bq/L)

IR : 일일 먹는 샘물 섭취율 (L/day)

EF : 노출시간당 노출 수(day/year)

IDC : 연령별 섭취 선량계수 (Sv/Bq)

III. 결과

1. 방사능측정

생수와 혼합 음료의 방사능 측정 결과는 Table 3과 같다. 먹는 샘물에서는 K-40 측정 결과가 B water에서 5.471 Bq/kg이 검출되어 가장 높은 값을 보였고, 우라늄 계열인 Ra 자핵종 중 Bi-214는 C water에서 5.734 Bq/kg이 검출되어 가장 높은 값을 보였다. 혼합 음료의 방사능 측정 결과는 K-40과 Bi-214 모두 K water에서 각각 4.872 Bq/kg, 5.305 Bq/kg이 검출되어 가장 높은 값으로 확인되었다. 측

Table 3. Radioactivity Measurement Result

Type	Sample Name	Analysis Date	Weight (kg)	Measurement Result (Bq/kg)					
				Artificial Radionuclide			K Series	Ra Series	
				I-131	Cs-134	Cs-137	K-40	Bi-214	Pb-214
Drinking Water	A	2021-05-21	0.964	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA
	B	2021-05-21	0.980	< MDA	< MDA	< MDA	5.471	< MDA	< MDA
	C	2021-05-25	1.014	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA	5.734	< MDA
	D	2021-05-20	0.959	< MDA	< MDA	< MDA	4.946	< MDA	< MDA
	E	2021-05-24	0.964	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA	5.539	< MDA
	F	2021-06-06	0.967	< MDA	< MDA	< MDA	4.572	5.267	< MDA
	G	2021-05-25	0.973	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA
	H	2021-05-20	1.000	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA	2.596	< MDA
	I	2021-05-21	0.963	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA
Mixing	J	2021-05-20	0.961	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA	< MDA
	K	2021-05-24	1.017	< MDA	< MDA	< MDA	4.872	5.305	< MDA
	L	2021-05-25	1.018	< MDA	< MDA	< MDA	3.701	2.759	< MDA
	M	2021-05-24	1.020	< MDA	< MDA	< MDA	2.638	< MDA	< MDA

Table 4. Risk Assessment of Radioactivity Measurement

Type	Sample Name	Measurement (Bq/kg)		Comparison of Ra-226 according to WHO Regulation	Internal Exposure Dose (mSv/yr)	
		K-40	Bi-214	Bi-214 (Times)	K-40	Bi-214
Drinking Water	A	< MDA	< MDA	-	-	-
	B	5,471	< MDA	-	0,025	-
	C	< MDA	5,734	5,74	-	1,156
	D	4,946	< MDA	-	0,023	-
	E	< MDA	5,539	5,54	-	1,174
	F	4,572	5,267	5,27	-	1,113
	G	< MDA	< MDA	-	-	-
	H	< MDA	2,596	2,60	-	0,531
	I	< MDA	< MDA	-	-	-
Mixing	J	< MDA	< MDA	-	-	-
	K	4,872	5,305	5,31	0,022	1,067
	L	3,701	2,759	2,76	0,016	0,554
	M	2,638	< MDA	-	0,012	-

정을 종합한 결과, 대부분 항목은 검출한계치 미만의 방사능 값을 나타내어 방사능이 검출되지 않았으나 일부 생수와 혼합 음료에서 미량의 방사능 측정 결과가 산출되었다. 한편, 모든 생수 및 혼합음료에서 I-131, Cs-134 및 Cs-137이 검출되지 않은 것으로 보았을 때 방사능 낙진 등으로 인한 수원지 오염 등은 없는 것으로 파악되었다.

2. 내부피폭선량평가

우리나라는 먹는 샘물에 대한 자연방사능 권고 기준치가 없어 세계보건기구 권고 기준과 비교하여 위험도를 평가하여 보았다. 평가 결과, 대부분의 생수의 경우 지표핵종인 Bi-214가 검출되지 않았으나 일부의 경우에는 권고 기준치인 1 Bq/L를 초과하여 최대 5.74배의 위험도가 나타난 결과를 나타내었다.

또한 세계보건기구와의 비교수치와 내부피폭선량평가 결과는 Table 4와 같이 나타났다.

에서 생수에서의 방사능 농도가 오히려 더 많이 검출되었음을 확인하였고, 이는 관리의 여부보다는 수원지 지반에 따른 특성의 영향이 더 클 것으로 나타났다. 특히 우리나라 생산 생수에서 높게 나타나는 경향을 보였는데 이는 우리나라가 화강암 지대로서 우라늄의 자손핵종인 Ra-226의 방출이 보다 많이 나타났으며, 이는 S. Mehdizadeh 등의 연구에 비해 많이 높게 나타남을 알 수 있다[14]. 또한, 세계보건기구(WHO)에서 권고하는 먹는 물의 피폭선량을 기준으로 하여 Ra-226의 내부피폭을 산정한 결과, 최대 연간 1.17 mSv의 값이 도출되어, 국제방사선방호위원회(ICRP)에서 권고하는 일반인의 선량한도인 1 mSv를 초과하는 것으로 나타났다[15]. 비록 데이터가 방대하여 이를 전부 일반화하여 나타낼 수는 없으나 도출된 결과가 인체에 상당한 영향을 미칠 수 있고, 그 대상이 생존에 필수적인 먹는 샘물이기 때문에 이에 대한 대책 마련이 시급하여 보이는 것으로 판단된다.

본 연구를 위해 국내 먹는 물 방사능 검사 규정에 포함되어 있는 H-3, Sr-90, Cs-137 중 Cs-137만 방사능 분석을 수행하였다는 것이 본 연구의 한계점이다. 이들의 핵종은 각 6.0 Bq/L, 3.0 mBq/L, 4.0 mBq/L으로 기준값이 설정되어 있는데, Cs-137의 경우 방사능 오염에서 자유로움을 측정 결과 확인하였으나 H-3, Sr-90 핵종에 대해서도 규명하고자 하는 노력이 필요할 것으로 사료된다. 방사능에 대한 국내 수질의 현 기준에 대한 적합성 여부를 지속적으로 모니터링하는 것도 중요할 것으로 사료된다.

미국은 대표적인 자연방사능 핵종인 Ra-226이 폐암을

IV. 고 찰

연구를 진행하기 전, 방사능 검사를 이행하지 않는 혼합음료의 방사능이 생수보다 더 높게 검출될 것으로 가설을 설정하였다. 이는 먹는 샘물의 경우 관리항목이 50여 가지로 많은 검증을 거치나 혼합음료의 경우에는 8가지 항목으로 한정되어 있기 때문으로 사료되었다. 그러나 실제 연구

유발하는 인체 유해성 때문에 음용수에 대한 Ra-226의 권고치를 제시하고 이를 지키도록 규정하고 있다. 그러나 우리나라의 경우, 기준치를 초과할 우려가 충분히 존재하는 먹는 샘물 내 Ra-226에 대해서는 안전관리 기준에 포함되어 있지 않다. 생활방사선 방호측면에서 이에 대한 지속적인 모니터링을 통해 적절한 기준치를 설정하여 권고치를 제시하는 것이 필요하다고 판단된다. 본 연구가 먹는 샘물에 대한 방사성 물질 연구의 지속적인 필요성 고취 및 향후 연구를 수행될 기반 자료로서의 성격을 가질 수 있다는 점에서 유용할 것으로 사료된다.

V. 결론

생수와 혼합 음료의 방사능 농도 분석을 통해 실제 먹는 샘물에 대한 방사능 함유 여부를 알아보고, 이에 대한 내부 피폭 선량평가를 실시하여 세계보건기구의 기준치와 비교하여 유해성을 알아보았다. 생수에 대한 방사능 분석 결과, K-40은 B water에서 약 5.5 Bq/kg이 가장 높게 검출되었고, Bi-214의 경우 C water에서 약 5.7 Bq/kg이 검출되어 가장 높은 값을 나타내었다. 혼합 음료의 경우에는 두 핵종 모두 K water에서 4.9 Bq/kg 및 5.3 Bq/kg의 결과로 가장 높게 검출되었다. 이에 대한 유해성을 평가한 결과, Ra-226에 대해 연간 최대 1.17 mSv의 피폭선량을 받을 수 있다는 결과값이 도출되었고, 이는 일반인 선량한도를 초과할 수 있기 때문에 생활방사선 방호측면에서 이에 대한 적합한 기준 및 권고의 마련이 시급한 것으로 나타났다.

REFERENCES

- [1] U.S. Environmental Protection Agency, National primary drinking water regulations; Radionuclides, Final Rule, Federal register, 2000. Available from: <https://www.federalregister.gov/documents/2000/12/07/00-30421/national-primary-drinking-water-regulations-radionuclides-final-rule>.
- [2] WHO. Guideline, Guidedlines for drinking-water quality. 4th edition, 2017. Available from: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>.
- [3] National Institute of Environmental Research, Drinking water quality process test standards; ES 05801~3.1 Cs-137, Sr-90, H-3; 2021 Available from: <https://www.nier.go.kr/NIER/cop/bbs/selectNoLoginBoardList.do#>.
- [4] Ju BK, Kim M, Kim HK, Kim DS, Cho SJ, Yang JH, et al. Evaluation of 226Ra analysis methods using a gamma-ray spectrometer and a liquid scintillation counter. *Analytical Science and Technology*. 2015; 28(3):228-35.
- [5] Kim BG, Ha WH, Kwon TE, Park MS, Lee JH, Kim JM, et al. Performance comparison of bed-type and stand-type commercial whole body counter made by canberra for internal exposure monitoring. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2018;41(5): 437-44.
- [6] Lee W, Kim HR, Chung KH, Cho YH, Kang MJ, Lee CW, et al. Uranium activity analysis of soil sample using HPGe gamma spectrometer. *Journal of Radiation Protection and Research*. 2010;35(3): 105-10.
- [7] ISO 18589-3, Measurement of radioactivity in the environment—Soil—Part 3: Test method of gamma-emitting radionuclides using gamma-ray spectrometry; 2015. Available from: <https://www.iso.org/standard/60059.html>.
- [8] Ahmed AS, Capello K, Chiang A, Cardenas-Mendez E, Kramer GH. Optimization of geometric parameters for Marinelli beaker to maximize the detection efficiency of an HPGe detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 2009;610(3): 718-23.
- [9] Jang ES, Gim YS, Lee SY. Marinelli beaker measurement and self absorption correction and application for various environmental samples in monte carlo simulation. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2017;40(4):605-11.
- [10] Chung EK, Jang JK, Kim KB, Park HE, Song SW. A study for occupational exposure and OELs of radon. Occupational Safety and Health Research Institute; 2015. Available from: <https://www.kosha.or.kr/kosha/researchField/researchReportSearch.do?mode=view&articleNo=63487&article.offset=260&articleLimit=10>.
- [11] Ji YY, Chung KH, Lim JM, Kim CJ, Jang M, Kang MJ, et al. Feasibility about the direct measurement

- of ^{226}Ra using the gamma-ray spectrometry. Journal of the Korean Radioactive Waste Society. 2014;12(2):97-105.
- [12] Korea Institute of Nuclear Safety. Environmental radioactivity survey in Korea. Vol.49. 2017. p.74. Available from: <https://dldrm.nanet.go.kr/ezpdfdrm/jsp/download.jsp?path=4954866/1440628712>.
- [13] Eckerman K, Harrison J, Menzel HG, Clement CH. ICRP publication 119: Compendium of dose coefficients based on ICRP publication 60. Annals of the ICRP; 2012.
- [14] Mehdizadeh S, Faghihi R, Sina S, Derakhshan S. Measurements of natural radioactivity concentration in drinking water samples of Shiraz city and springs of the Fars province, Iran, and dose estimation. Radiat Prot Dosimetry. 2013;157(1):112-9.
- [15] ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. 2007. Available from: <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>.

구분	성명	소속	직위
제1저자	조정원	가천대학교	학부생
제1저자	이상복	가천대학교 대학원/선광 T&S	박사대학원생 /기술책임자
공동저자	남조현	가천대학교	학부생
공동저자	노은정	가천대학교	학부생
공동저자	백현우	가천대학교	학부생
공동저자	이예진	가천대학교	학부생
공동저자	이준세	가천대학교	학부생
공동저자	최지원	가천대학교	학부생
교신저자	김성철	가천대학교	정교수