

감마선 분광법을 이용한 지하수 중의 ^{226}Ra 분석

서범경* · 이길용* · 윤윤열* · 이근우

한국원자력연구소 제염해체기술연구개발부*, 한국지질자원연구원 환경지질연구부*
(2002. 9. 7 접수, 2002년. 12. 9 승인)

Analysis of ^{226}Ra in the Groundwater Using the Gamma-ray Spectroscopy

Bum-Kyoung Seo*, Kil-Yong Lee*, Yoon-Yeol Yoon* and Kune-Woo Lee

Division of Decommissioning Technology Development, Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Deokjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-353, Korea

*Environmental Geology Division, Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 30 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea

(Received Sept. 7, 2002, Accepted Dec. 9, 2002)

요 약 : 시료 전처리가 필요 없는 감마선 분광분석법을 이용하여 지하수 중의 라듐 (^{226}Ra) 분석을 위한 측정법을 확립하였다. 방사평형된 딸핵종을 이용한 라듐의 분석 시 가장 문제가 되는 대기 중 라돈 딸핵종에 의한 바탕계수는 측정함 내부로 질소가스를 흘려주므로써 해결하였고, 라듐과 그 딸핵종들 사이의 방사평형 과정에서 생성된 라돈가스의 용기 외부로의 누출은 밀폐된 알루미늄 용기를 사용함으로써 방지할 수 있었다. 또한 측정용기 내부의 공기층에 의한 방사능 변화정도를 조사하기 위하여 임의로 공기층을 만들어 측정한 결과, 물 속에 녹은 라돈의 공기층으로의 발산에 의한 방사능 변화정도는 통상적인 측정오차인 5% 범위 이내였다. 측정 시 검출기 주위로 질소가스를 흘려줌으로써 대기 중 라돈 딸핵종에 의한 간섭을 제거하였고, 검출 하한값을 0.02 Bq/L로 낮출 수 있었다. 이는 최근 US Environmental Protection Agency (EPA)에 의하여 제안된 지하수 중의 ^{226}Ra Maximum Contaminant Level (MCL)인 0.74 Bq/L보다 충분히 작음으로서 감마선 분광법을 이용하여 지하수 중의 라듐을 방사능 농도를 정확히 결정할 수 있는 것을 확인하였다.

Abstract : The measurement of radium (^{226}Ra) in the groundwater was established using γ -ray spectroscopy without sample preparation. The background interference by air borne radon daughter nuclides was reduced by N_2 gas flow into the counting chamber. Leakage of radon gas produced in the radioactive equilibrium with radium and its daughter nuclides was prevented by use of the air-tighted aluminium container. We investigated the effect of air layer in the counting container. Radioactivity variation due to emanation of radon into the air layer was within the counting error range 5 %. When

★ Corresponding author

Phone : +82+(0)42-868-8210 Fax : +82+(0)42-868-2499

E-mail : bumja@kaeri.re.kr

the nitrogen gas was flowed around the detector, peak counts of γ -rays from the daughters of airborne radon were decreased and detection limit was decreased to 0.02 Bq/L. The detection limit of detector was lower than 0.74 Bq/L, the ^{226}Ra Maximum Contaminant Level (MCL) in the groundwater proposed by US Environmental Protection Agency (EPA). It was confirmed that ^{226}Ra radioactivity in the groundwater could be determined by the γ -ray spectroscopy.

Key words : radium, HPGe detector, MCL, radioactive equilibrium, background reduction

1. 서 론

지하수 중의 라듐 분석방법은 액체섬광계수기(Liquid Scintillation Counter, LSC)를 이용하는 알파선 분광법이 주로 이용된다. 이러한 알파선 분광법에 의한 라듐 분석법은 높은 검출효율에 비하여 시료의 용해 및 추출 등 복잡한 시료 전처리 과정이 필요하고 또한 오랜 시간이 소요되기 때문에 많은 오차요인을 포함하고 있다. 그러나 분해능이 우수한 HPGe(High Purity Ge) 검출기를 사용할 경우 검출효율은 알파선 분석법에 비하여 낮지만 여러 가지 핵종에서 방출되는 대부분의 감마선을 구분할 수 있고, 시료 전처리 과정이 필요 없기 때문에 오차요인을 많이 줄일 수 있다. 최근 들어서 천연핵종 중의 우라늄 및 토륨계열 핵종의 분석 등에 활발하게 이용되고 있는 추세이다.^{1,4}

감마선을 이용한 라듐 분석법 중에서 ^{226}Ra 으로부터 방출되는 186.1 keV 감마선을 직접 측정하여 분석할 경우에는 검출기 물질이나 시료 자체에 함유된 ^{235}U 로부터 방출되는 185.7 keV 감마선의 간섭을 제거하기가 어렵기 때문에 상대적으로 높은 농도의 ^{226}Ra 이 포함된 시료에만 적용할 수 있다. 그러므로, ^{226}Ra 과 방사평형된 ^{214}Pb 또는 ^{214}Bi 에서 방출되는 감마선을 이용한 분석법이 일반적으로 많이 사용되고 있다. 그러나 이것은 방사평형 과정에서 생성된 라돈가스가 측정용기를 완전히 밀봉하지 않으면, 측정용기 외부로 방출될 수 있기 때문에 딸핵종들과 완전한 방사평형에 도달하지 않게 된다는 것이다. 특히, 액체시료의 경우 물 속에 녹은 라돈이 젖은 플라스틱 벽을 통하여 쉽게 빠져나갈 수 있기 때문에,⁵ 이러한 라돈가스의 누출을 방지할 수 있는 측정용기 재질이 요구된다. 또한, 방사평형된 딸핵종을 이용한 라듐의 분석 시 가장 문제가 되는 것은 대기중의 라돈 딸핵종에 의한 간섭으

로서, 이러한 간섭을 제거할 수 있다면 측정의 정밀도를 향상시킬 수 있을 것이다.

본 연구에서는 고체형태의 환경시료에 대해 확립된 라듐 분석방법^{6,7}을 액체시료에 대하여 적용하였다. 라듐과 딸핵종 간의 방사평형 과정에서 발생하는 라돈가스의 누출을 방지하기 위하여 알루미늄 측정용기를 사용하였고, 대기 중 라돈 딸핵종에 의한 간섭을 제거하기 위하여 측정함 주위에 질소가스를 흘리면서 측정하였다. 또한, ^{226}Ra 표준용액을 이용하여 라듐과 그 딸핵종들 간의 방사평형 과정을 확인하였으며, 측정용기 내부의 공기층으로 라돈가스가 발산할 수 있으므로 이에 의한 방사능 변화정도를 조사하였다. 이러한 측정 조건을 바탕으로 감마선 분광분석법을 이용한 지하수 중에 포함된 라듐 방사능을 측정할 수 있는 분석법을 확립하였다. 확립된 분석법을 바탕으로 최근에 US EPA에 의하여 제안된 음용수 중의 라듐에 대한 MCL(Maximum Contaminant Level)인 20 pCi/L(0.74 Bq/L)을 감마선 분광분석법을 이용하여 측정할 수 있는 조건을 조사하였으며, EPA에서 요구하는 ^{226}Ra 에 대한 검출하한값인 1 pCi/L(0.037 Bq/L)을 만족한다는 것을 확인하였다.

2. 이 론

토양이나 건축자재와 같은 물질 내부에서 생성된 라돈가스는 균열이나 공극을 통하여 외부로 방출된다. 이 때 물질 내부에서 생성된 라돈 중에서 외부로 빠져나간 라돈의 비를 발산계수(emanation coefficient)라 하고, 단위 시간당 단위 면적을 통하여 방출된 라돈의 양을 방출률(exhalation rate)이라 한다.⁸

Fig. 1과 같이 시료의 체적이 V_0 이고, 시료를 제외한 용기의 체적이 V_1 , 방출면적 2S, 시료의 두께가 2L,

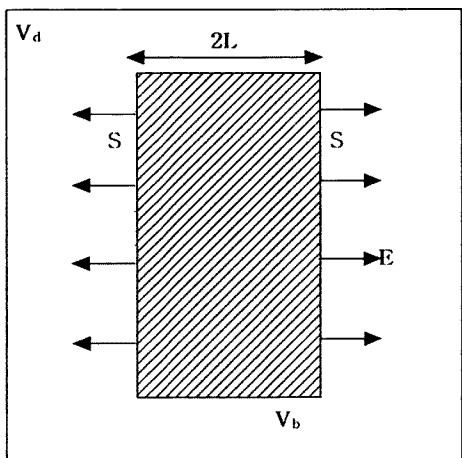


Fig. 1. The container with radon-exhaling material. (V_d ; container volume, $2L$; thickness of sample, S ; sample area, E ; emanation rate, and V_b ; sample volume)

$$N = \frac{c}{\lambda V_d} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2)$$

또는 방사능 농도로 표현하면 다음과 같다.

$$R = \frac{c}{V_d} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (3)$$

여기서 라돈이 λ^* 의 비율로 용기를 빠져나간다고 가정하자. 즉, 방사능 성장식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{c}{V_d} - (\lambda + \lambda^*)N \quad (4)$$

방사능으로 표현한 식 (4)의 해는 다음과 같다.

$$R^* = \frac{\lambda}{\lambda + \lambda^*} \cdot \frac{c}{V_d} \{ 1 - e^{-(\lambda + \lambda^*)t} \} \quad (5)$$

Fig. 2는 측정용기 외부로 라돈가스의 누출이 있는 경우와 없는 경우에 대한 방사평형 과정을 나타낸 것이다. 즉, 방사평형 과정에서 딸핵종의 누출에 의한 평형값은 누출 없이 완전한 방사평형에 도달하는 경우에 비해 $\lambda / (\lambda + \lambda^*)$ 만큼 감소되었다

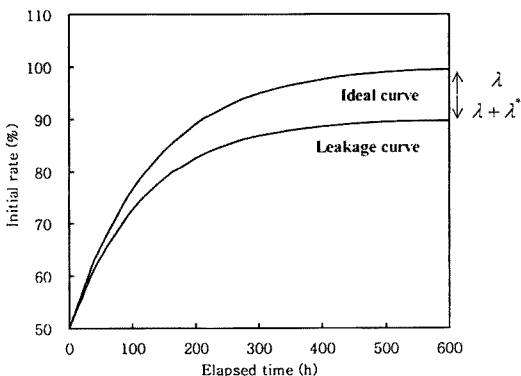


Fig. 2. Radioactive equilibrium curve for radon with and without leakage. (λ ; decay constant and λ^* ; leakage rate of radon)

그리고 면방출률이 E 인 경우를 고려하자. 만약 시료의 총 방출률이 c 라면, 라돈농도 (단위 체적당 원자수) N 은 다음의 식에 의해서 시간 t 에 따라 성장할 것이다.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{c}{V_d} - \lambda N \quad (1)$$

이 식에서 라돈 원자는 단지 방사성 붕괴에 의해서만 제거된다고 가정하였다. 만약 c 가 N 에 무관한 상수라고 가정한다면, 식 (1)은 다음의 해를 가진다.

3. 실험 방법

감마선 측정에 이용한 검출기는 EG&G ORTEC사의 HPGe 검출기 (GEM-20180-P)로써, 상대효율은 20%, 에너지 분해능은 ⁶⁰Co 1.33 MeV 감마선에 대하여 1.8 keV였다. 환경중에서 방출되는 자연방사성 핵종 중에서 에너지가 가장 큰 ²⁰⁸Tl의 2614.7 keV 감마선을 포함하기 위하여 측정에너지 영역은 0 ~ 3 MeV로 설정하였다.

측정용기는 라듐과 그 딸핵종 간의 방사평형 시 생성되는 라돈가스의 손실을 막기 위하여 알루미늄 재질을 사용하였고, 1000 mL Marinelli 비커형으로 제작하였다. 제작한 1000 mL Marinelli 비커의 도면은 Fig. 3에 나타내었다. 밀봉시의 접촉부분은 고무 O-ring을 사용하여 라돈이 방출되지 않도록 하였다. 측정시 시료 위치의 변동에 의한 오차를 없애기 위해서 측정용기를 일정한 위치에 고정할 수 있도록 지지대도 제작하여

설치하였다. 검출기와 측정용기의 기하학적 배치도는 Fig. 4에 나타내었다.

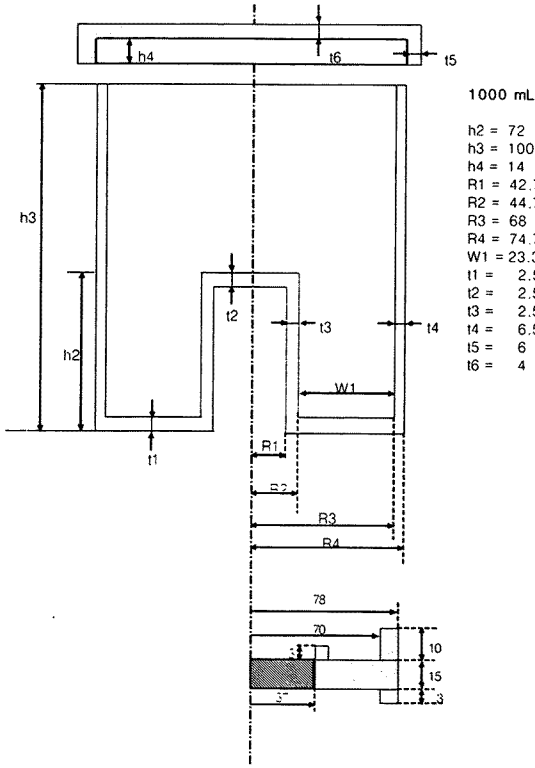


Fig. 3. Specification of the manufactured 1000 mL Marinelli beaker.

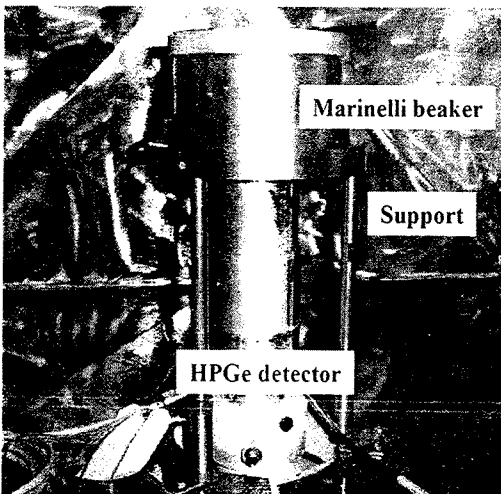


Fig. 4. Measuring geometry of the 1000 mL Marinelli beaker and detector.

검출기의 효율을 결정하기 위한 표준선원은 NIST 의 Standard Reference Material 4967 (²²⁶Ra)을 사용하였다. SRM 4976은 5 mL 증류수에 용해된 ²²⁶RaCl₂, BaCl₂, 그리고 염산으로 이루어졌으며, 전체 부피는 5 mL이고 비방사능은 2,729 Bq/g이다. 이 표준선원을 1.0 N의 질산용액과 희석하여 표준용액을 제조하였다. 제조한 표준용액은 측정용기에 담은 후 ²²⁶Ra과 딸핵종들 간의 방사평형을 고려하여 1달 이상 방치하면서 방사평형과정을 조사하였다. 측정시간은 통계오차를 1% 이내로 유지하기 위하여 10,000초 동안 측정하였다. 또한, 시료를 용기에 채우는 과정에서 발생할 수 있는 측정용기 내부의 공기층에 의한 효과를 조사하기 위하여, 표준용액을 용기에 채우면서 임의로 공기층을 만들어 라돈의 발산에 의한 효율의 변화정도를 조사하였다. 모든 실험은 측정 불확도를 줄이기 위하여 5회 반복하여 측정하였다.

또한 측정함 내의 대기 부유 방사선에 의한 바탕계수 저감을 위하여, 측정함 내부로 질소가스를 일정하게 흘려주었다. 이 때 두 개의 질소가스통을 연결하여 유량계로 질소가스의 양을 일정하게 조절하였다. 측정하기 전에 측정함 내에 존재하는 공기 중 라돈 딸핵종에 의한 간섭을 제거하기 위하여 약 5 L/min의 유속으로 1 시간 정도 흘려주었다. 측정시의 유속은 측정시간 및 질소가스의 용량을 고려하여 2.5 L/min으로 일정하게 유지하였다. 사용이 끝난 질소가스통은 새로운 가스통으로 교체하므로써 외부 공기가 측정함 내부로 유입되는 것을 막았다.

4. 결과 및 고찰

4.1 액체시료의 라듐 분석

²²⁶Ra과 방사평형된 딸핵종에 의한 간접분석의 경우는, ²¹⁴Pb의 295.2와 351.9 keV 그리고 ²¹⁴Bi의 609.3 keV 감마선을 주로 이용한다. Fig. 5는 ²²⁶Ra 표준용액의 방사평형 스펙트럼을 나타낸 것으로서, ²²⁶Ra로부터 직접 방출되는 186.1 keV 감마선과 ²²⁶Ra의 딸핵종인 ²¹⁴Pb와 ²¹⁴Bi에서 방출되는 여러 감마선들을 볼 수 있다.

표준용액을 알루미늄 측정용기에 담아 완전히 밀봉한 뒤, ²²⁶Ra과 그 딸핵종 간의 방사평형 과정을 조사하기 위하여 일정한 시간 간격을 두고 한달 이상동안

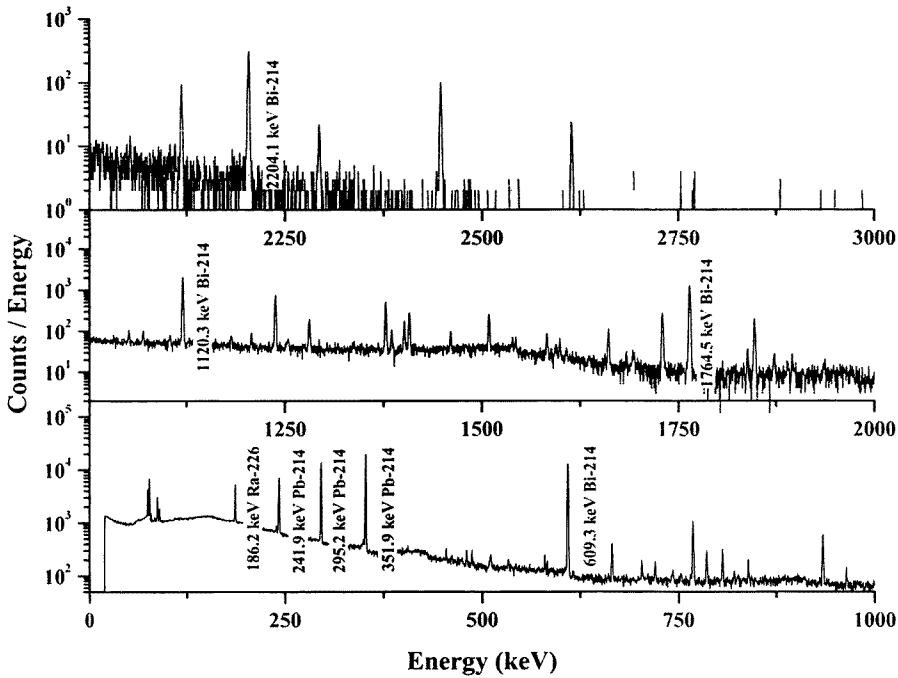


Fig. 5. Radioactive equilibrium spectrum of the ^{226}Ra standard solution

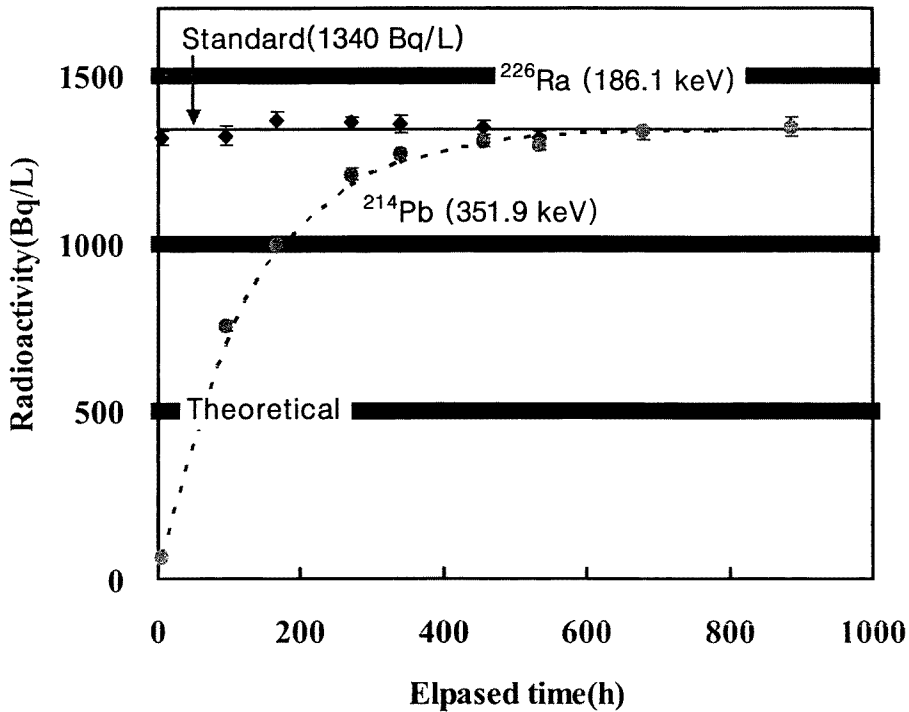


Fig. 6. Radioactive equilibrium process of the ^{226}Ra with a daughter nuclide.

측정하였다. 측정결과 ²²⁶Ra의 딸핵종인 ²¹⁴Pb의 351.9 keV 감마선에 대한 방사평형 과정은 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 실선은 표준용액의 방사능이며, ²²⁶Ra의 186.1 keV 감마선을 이용하여 계산한 방사능(◆)과 ²¹⁴Pb의 351.9 keV 감마선을 이용하여 계산한 방사능(●)을 나타낸 것이다. ²²⁶Ra의 186.1 keV 감마선을 이용한 방사능 계산은 실제 방사능과 오차범위 이내로 아주 잘 일치하는 것을 알 수 있고, ²²⁶Ra의 딸핵종인 ²¹⁴Pb의 351.9 keV 감마선을 이용한 방사능은 시간이 경과함에 따라 점점 포화되어 실제 방사능에 도달하는 것을 볼 수 있다. 즉, 완전히 방사평형에 도달한 후에는 딸핵종을 이용하여 분석하여도 실제 방사능과 동일한 값을 얻을 수 있다. 또한 Fig. 6에서 알 수 있듯이 딸핵종이 완전한 방사평형에 도달하여 어미핵종과 동일한 방사능을 가진다는 것은 측정용기 외부로 방사평형 과정에서 생성된 라돈가스가 방출되지 않았다는 것을 의미하기도 한다. 이는 본 연구에서 제작한 알루미늄 용기를 지하수와 같은 액체시료에 적용할 경우에도 정확한 방사능을 결정할 수 있다는 것을 나타낸다.

측정시료를 용기를 채우는 과정에서 효율교정용 표준선원과 동일한 기하학적 조건을 맞추기는 어려운 일이다. 특히 액체시료의 경우는 용기내부에 공기층 없이 완전히 채우기는 어려운 일이다. 이러한 측정용기 내부의 공기층에 의한 오차요인으로는 시료량의 차이로 인한 효율변화와 공기층으로 라돈가스가 발산하므로써 시료내부에서 측정 방사능이 균질하게 분포하지 않는다는 것이다. 그러나 이전의 연구에서 Marinelli 비커에 채운 시료량의 작은 차이(2 % 내외)에 따른 효율의 변화정도는 무시할 수 있다고 보고되었다.⁹ 즉, 액체시료와 같이 시료 중에 녹아있는 라돈이 쉽게 방출될 수 있는 경우에는 측정용기 내부의 공기층에 의한 효과를 고려하여야할 것이다. 이를 위하여 측정용기에 임의의 공기층을 만든 표준시료 (방사능: 137 Bq/L) 2개를 준비하였다. 측정용기 내부의 공기층은 표준시료를 채운 후의 무게에서 빈용기의 무게를 빼주므로써 결정하였다. 측정용기 내부의 공기층은 2 mL와 20 mL 부피가 되도록 준비를 하였는데, 이는 측정 효율에 영향을 미치지 않고 시료를 담는 과정에서 발생할 수 있는 오차를 고려하여 준비하였다. 이 표준시료들을 완전한 방사평형에 도달할 수 있는 충분한 시간동안 방치한 후 측정된 결과는 Table 1과 같다. 직접측정은 ²²⁶Ra의 186.1 keV 감마선을 이용하여 분한

결과이고 간접측정은 방사평형된 딸핵종인 ²¹⁴Pb와 ²¹⁴Bi의 감마선을 이용하여 측정된 결과이다. 분석결과는 표준시료의 방사능과 5% 오차범위 이내의 값으로 결정될 수 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 위의 실험결과 측정용기 내부에 존재하는 공기층으로의 라돈가스의 방출은 완전한 평형상태에 도달하면, 어느 정도의 공기층이 존재한다하여도 통상적인 오차범위 이내의 값으로 방사능을 결정할 수 있다는 것을 알 수 있다.

Table 1. Radioactivity comparison of ²²⁶Ra by air layer in the counting container

Standard solution (Radioactivity 137 Bq/L)	Elapsed time (h)	Radioactivity (Bq/L)	
		Direct measurement	Indirect measurement
	840	141.61 ± 7.90	134.55 ± 3.18
Air layer 2 mL	1130	137.90 ± 7.08	144.15 ± 2.13
	1260	143.15 ± 6.48	141.86 ± 1.20
	1160	139.58 ± 6.78	135.36 ± 3.14
Air layer 20 mL	1280	137.59 ± 4.84	130.43 ± 2.45

4.2 질소분위기에 의한 측정조건 결정

최근에 EPA에 의하여 제안된 지하수 중의 ²²⁶Ra에 대한 MCL (Maximum Contamination Level)인 20 pCi/L (0.74 Bq/L)를 HPGe 검출기를 이용하여 측정할 수 있는 조건을 조사하였다. 측정환경의 검출하한값을 낮게 유지시키기 위해서는 가장 우선되어야할 것이 바탕계수 저감화일 것이다. 일반적으로 라듐을 분석하기 위하여 방사평형된 딸핵종을 이용하는 간접분석의 경우에 바탕계수로서 가장 크게 작용하는 것은 대기중 라돈 딸핵종에 의한 감마선이다. 이러한 간섭을 제거하기 위하여 측정함 주위로 질소가스를 흘려주었다. Fig. 7은 질소가스를 흘려줄 때와 흘려주지 않을 때의 200에서 700 keV 영역의 바탕계수 변화도를 나타낸 것이다. 대기 중의 라돈 딸핵종인 ²¹⁴Pb와 ²¹⁴Bi 감마선은 거의 소멸된 것을 볼 수 있다.

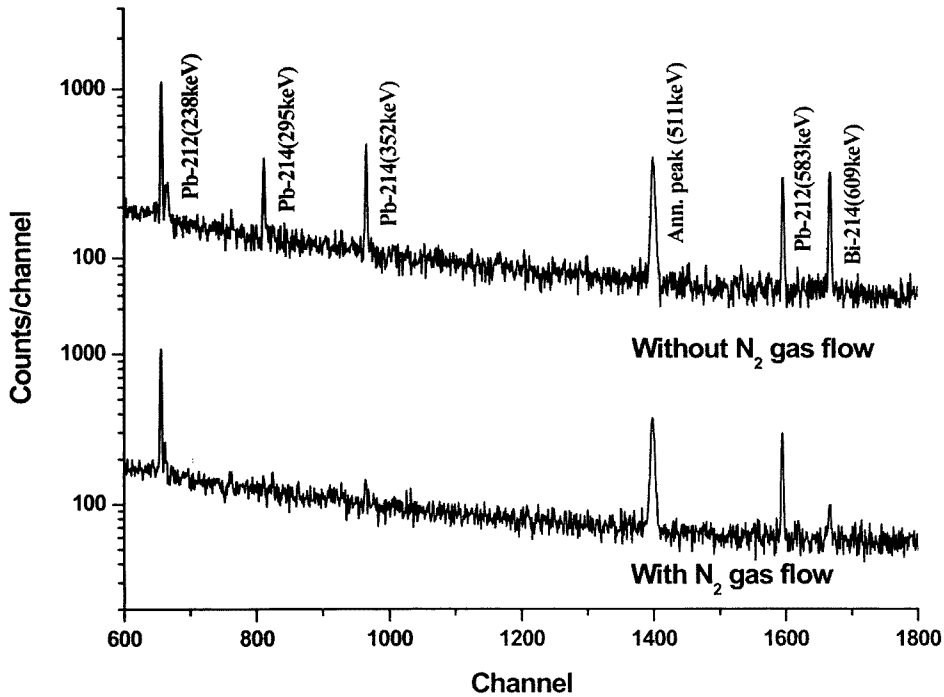


Fig. 7. Variation of the background spectrum with N_2 gas flow.

Table 2. Comparison of background radioactivity with and without N_2 gas flow

Background	Nuclide	Energy (keV)	Counting time (s)					
			40,000	80,000	100,000	120,000	160,000	200,000
Without N_2 gas flow	^{226}Ra	186.2	20.05	20.06	19.90	19.65	18.44	18.03
	^{214}Pb	295.2	1.78	1.75	1.59	1.27	1.28	1.30
		351.9	1.12	1.15	1.27	1.04	1.00	1.09
	^{214}Bi	609.3	1.25	1.19	1.15	1.19	1.17	1.18
		1120.3	4.31	4.99	4.96	4.82	4.35	4.25
		1764.5	9.71	10.07	9.03	8.33	8.42	8.24
With N_2 gas flow	^{226}Ra	186.2	19.20	18.20	17.72	17.94	17.11	16.54
	^{214}Pb	295.2	<0.03	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.01
		351.9	<0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	^{214}Bi	609.3	<0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
		1120.3	6.28	5.09	5.00	3.90	4.01	3.92
		1764.5	6.25	6.61	6.97	6.62	7.08	7.41

Table 2는 질소가스를 흘려줄 때와 흘려주지 않을 때의 측정시간별 1000 mL Marinelli 비커에 대한 바탕계수 기여 방사능을 나타낸 것이다. 방사평형된 딸핵종을 이용한 라듐분석에 이용되는 ^{214}Pb 의 351.9 keV와 ^{214}Bi 의 609.3 keV 감마선에 대한 질소가스를 흘려주지 않은 통상적인 바탕계수 기여 방사능은 대략 1 Bq/L 정도이다. 이는 EPA에 의하여 제안된 지하수 중의 ^{226}Ra 의 MCL인 0.74 Bq/L 이상의 방사능으로서 지하수 중에 포함된 낮은 준위의 라듐의 분석을 불가능하게 한다. 그러나 질소가스를 흘려주었을 때는 분석에 이용되는 감마선이 완전히 소멸되어 거의 간섭을 하지 않는다. 검출하한치 또한 통상적인 저준위 환경 방사능 측정시간인 40,000 초 정도에서 0.02 Bq/L로서 EPA에서 제안한 ^{226}Ra 의 MCL보다 충분히 낮으므로 지하수 중의 라듐의 분석시 MCL 초과여부를 화학적 전처리 없이 감마선 분석법을 통하여 비교적 간단하게 측정할 수 있을 것이다.

참고로, ^{226}Ra 의 186.2 keV 감마선에 대한 바탕계수 기여는 약 20 Bq/L로서 질소분위기와 상관없이 거의 같은 값을 가진다. 이는 대기 중에 존재하는 것이 아니라 차폐체와 검출기 구성물질 속에 포함되어있는 ^{235}U 의 185.7 keV 감마선이 바탕계수로서 작용하는 것을 알 수 있다. 또한, ^{214}Bi 의 1120.3와 1764.5 keV 감마선의 경우는 질소분위기에 의한 바탕계수 기여 방사능의 차이가 아주 작는데, 이는 차폐체 바깥의 대기 중 라돈 딸핵종에 의한 감마선이 납차폐체를 투과하여 간섭을 일으키기 때문이다.

5. 결 론

지하수 중의 라듐분석을 위하여 HPGe 검출기를 이용한 감마선 분광분석법을 확립하였다. 자체 제작한 알루미늄 Marinelli 비커를 사용할 경우 방사평형과정에서 생성되는 라돈가스의 누출없이 라듐과 그 딸핵종들 사이에 완전한 방사평형에 도달하는 것을 확인하였으며, 표준시료를 이용하여 분석한 결과 방사평형된 딸핵종을 이용한 간접분석 방법으로도 라듐의 정확한 방사능을 결정할 수 있었다. 또한 물시료를 측정용기에 채우는 과정에서 용기 내부에 공기층이 생길 수 있으며, 라듐과 딸핵종들 간의 방사평형과정에 생성된 기체상태의 라돈은 쉽게 공기층으로 발산할 수 있다. 이러한 측정용기 내부의 공기층에 의한 라돈발산의 효

과를 조사하기 위하여 측정용기 내부에 임의의 공기층을 만들어 평가하였는데, 공기층이 전체 부피의 2% 정도를 차지하여도 실제 방사능은 통상적인 측정오차 범위인 5% 이내로 결정할 수 있었다. 즉, 통상적으로 시료를 채우는 과정에서 발생할 수 있는 공기층에 의한 라돈의 발산 정도는 무시할 수 있을 것이다.

감마선 분광법을 이용하여 복잡한 시료 전처리 없이 비교적 간단한 방법으로 지하수 중의 ^{226}Ra 에 대한 MCL (0.74 Bq/L) 초과 여부를 조사하기 위하여 검출기의 검출하한값을 조사하였다. 라듐과 방사평형된 딸핵종을 이용한 간접분석법의 경우 가장 큰 바탕계수는 대기 중 라돈 딸핵종에 의한 기여이다. 이러한 대기중 라돈 딸핵종에 의한 바탕계수는 측정함 주위로 질소가스를 흘려줌으로써 대부분 제거할 수 있었으며, 검출하한값도 통상적인 저준위 환경방사능 측정시간인 40,000 초 정도에서 0.02 Bq/L로서 지하수 중 ^{226}Ra 의 MCL 이하로 충분히 낮았다. 즉, 본 연구에서 자체 제작한 알루미늄 측정용기를 이용하고 질소 분위기에서 측정한다면 EPA에서 제안한 ^{226}Ra 에 대한 지하수 중의 MCL 초과 여부를 감마선 분광법을 이용하여 손쉽게 평가할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2002년도 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

1. Y. Ishikawa, H. Murakami, T. Sekine, T. Saito and K. Yoshihara, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **178** (2), 301-310 (1994).
2. S. Mubarakmand, P. Chaudhry, and F. I. Nagi, *Nucl. Instr. Meth.*, **140**, 133-135 (1977).
3. H. M. Lau, M. Sakanoue, and K. Komura, *Nucl. Instr. Meth.*, **200**, 561-565 (1982).
4. K. H. Kim, and W. C. Burnett, *Anal. Chem.*, **55**, 1796-1800 (1983).
5. A. Canet, and R. Jacquemin, "The Environmental Behavior of Radium", Technical Report Series I(130), pp. 189-204, IAEA, 1990.
6. Bum Kyong Seo, Kil Yong Lee, Yoon Yeol Yoon,

- Dae Won Lee, *Fresenius J. Anal. Chem.*, **370**, 264-269 (2001).
7. 이길용, 윤윤열, 서범경, *분석과학*, **13** (6), 743-750 (2000).
8. A. El-Hussein, A. Mohammed, and A. A. Ahmed, *Atmospheric Environment*, **33**, 183, (1999).
9. 서범경, 이길용, 윤윤열, 이대원, 대한방사선방어학회 춘계학술발표회, 한양대, 서울 (2001).