

## 제주도 내 용천수 중의 Rn-222 방사능 측정

김희철 · 박재우 · 김계홍

제주대학교 공과대학 에너지공학과  
690-756 제주시 아라 1동 1번지

### Measurement of the Rn-222 activity in the spring-water Jeju island

Hee-Chul Kim, Jae-Woo Park,  
Gae-Hong Kim

Department of Nuclear and Energy Engineering  
Cheju National University, Jeju 690-756, Korea

#### ABSTRACT

When the water with a high radon concentration is taken, a portion of radon goes into the lung and it clings to a radon decayed daughter nuclides Po-218, Bi-214, Pb-214, Po-214 of radon, thus it may cause lung cancer. The spring-water is used for drinking water in most region of Jeju Island. There may be an internal exposure when habitants of the province took the spring-water. The safety of the spring-water used for drinking water is examined through the measurement of radiation quantity of Rn-222 in the spring-water. In this study, HPGe detector was used. As gamma-ray peak of the 351.9keV that is released from the daughter nuclide Pb-214 produced by decay of Rn-222 in spring-water was measured. Then the Rn-222 activity in a spring-water was determined. Through the investigation of the radioactive content in the ground water performed by National Institute of Environmental Research on a national scale in 2002, Rn-222 activity in the some area of Jeju

Island can be known. But it is not much different from this measurement. There has not been yet a limited value about radon in Korea when the limited value about radon is 4000pCi/L (~148Bq/L) in U.S. EPA.

**key word** : spring-water, HPGe detector, Rn-222 activity

#### 1. 서 론

가정이나 직장에서 사람에게 피폭되는 라돈은 두 가지 경로를 따른다. 하나는 소화기관을 통한 직접 피폭이다. 또 다른 하나는 수중에 녹아 있던 라돈이 공기 중으로 방출되고 그것을 흡입함으로써 붕괴된 라돈 딸핵종 Pb-214가 침착이 되어 호흡기를 통한 간접 피폭이다. 소화기를 통한 피폭은 물을 끓일 경우 대부분의 용존 라돈이 날아가 버리므로 생수를 직접 마시는 것이 주된 피폭 과정이다. 그런데 제주도 대부분의 지역에서는 용천수가 식수로 이용되기 때문에 도민들이 용천수를 섭취할 경우 라돈으로부터 체내에 피폭이 될 가능성이 있다. 따라서 제주도 지역 내에 용천수의 Rn-222의 방사선량을 측정하면 식수로서의 안정성을 평가할 수 있을 것이다.

현재 수중에서의 라돈을 측정하기 위해서는 일반적으로 Liquid Scintillation Counter(LSC)를 사용한다. 그러나 LSC로 측정하는 과정에서 시료를 제작하기 위해 복잡한 전처리 과정을 거쳐야 한다. 이 과정에서 불활성 기체인 라돈이 물에서 쉽게 빠져 나갈 수 있으므로 항상 정확한 결과를 준다고는 할 수 없다. 반면에 HPGe를 이용한 감마선 분광분석법에 의한 측정 방법은 시료 제작을 현장에서 즉시 만들 수 있으며, LSC로 측정하는 방법 과정에서 복잡한 시료의 전처리 과정을 필요로 하지 않고 HPGe 검출기(High Purity Germanium Detector)로 간단히 측정할 수 있다.

본 연구에서는 HPGe를 이용하여, 라돈의 딸핵종인 Pb-214가 방출하는 감마선의 피크치를 측정하였다. 딸핵종 Pb-214의 351.9keV 에너지 피크치의 계수율과 fitting된 검출 효율 값을 사용하여 라돈의 방사능을 결정하였다. 이를 위해 물시료를 Marinelli beaker 용기에 담고 라돈 가스가 방출되지 않도록 용기 주위를

실리콘으로 밀봉하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 용천수

대수층(지하수를 함유하고 있는 지층)을 따라 흐르는 지하수가 암석이나 지층의 틈을 통해 지표면으로 자연스럽게 솟아나는 지점을 용천(spring, 湧泉)이라고 하고, 이 물을 용천수(湧泉水)라 한다. 제주도 용천수의 용출위치는 지형의 변화와 밀접한 관계가 있다. 지형의 변화는 용암류의 불연속적인 분포, 하천의 형성, 분석구(오름)의 형성, 침식·퇴적작용, 화산 및 지진활동에 수반된 지질구조적인 운동 등 여러 가지 요인에 의해 생겨날 수 있다. 대부분의 용천수들은 하천의 절벽이나 벼랑, 요철지형의 오목지(凹地), 산기슭 등에 위치하고 있는데, 이는 중력의 지배를 받으며 유동하던 지하수가 지형 변화로 인하여 지하수면이 지표로 노출됨으로써 생겨나는 현상이다.

용천수가 제주도의 여러 곳에 분포하고 있는 가장 큰 이유 중의 하나는 강우량이 많고 제주도가 용암과 화산쇄설물이 겹겹이 쌓인 지질구조를 이루고 있기 때문이다. 용암류(熔岩流, lava flows)란 폭발성이 비교적 높지 않은 화산으로부터 분출된 녹아 있는 암석(熔融岩)이 하천의 흐름과 같이 지형경사가 높은 곳에서 낮은 쪽으로 흘러가는 흐름을 일컫는 말이다. 용암류는 지형이 낮은 골짜기를 따라 흐르기 때문에 광범위한 지역을 완전히 피복하지 못하며, 대체적으로 손가락 모양의 흐름지형을 형성한다. 따라서 동일시기에 분출한 용암류일지라도 공간적으로 불연속적인 분포를 이룰 수밖에 없기 때문에 용암의 흐름에 따라 지형변화가 생겨난다. 일단 용암지형이 형성되고 나면 다음에 용암류가 피복할 때까지(휴지기) 침식과 퇴적작용이 진행됨으로서 용암류 사이에는 투수성이 낮거나 좋은 지층이 형성되고 지하수의 흐름이 제어될 받게 된다.

한편, 용천수는 분석구(오름)의 기슭이나 침식면에서 용출하기도 한다. 분석구에 침투한 빗물이 지형경사를 따라 흐르다가 기슭이나 중앙부를 따라 생겨난 침식면에서 용출되기도 한다. 이러한 용천수들은 용출량이 수십 톤에 불과한 소규모의 것들이 대부분이며,

강우량에 따라 용출량의 변화도 심하게 일어난다.

제주도에는 용천수가 총 911개소가 있다. 그 중 수량 고갈·위치멸실·주변훼손 된 200개소를 제외해서 711개소가 이용되고 있으며, 그 중 상수원으로 이용되는 용천수는 28개소이다.

### 2.2 라돈과 라돈 딸핵종

폐암의 한 원인으로 지목받는 라돈은 지각의 암석이나 토양 중에 천연적으로 존재하는 U-238과 Th-232가 몇 단계 방사성붕괴를 거뒀던 후 생성되는 불활성 기체이다. U-238의 붕괴 생성물인 Ra-226이 붕괴하면 Rn-222가 되고, Th-232의 붕괴 생성물인 Ra-224가 붕괴하면 Rn-220이 된다. Rn-222와 Rn-220은 서로 동위원소 관계이다. 우라늄으로부터 라듐까지 붕괴되는 동안의 모든 핵종은 고체이므로 땅속에서만 붕괴가 진행된다. 그러나 라듐이 붕괴하여 생성되는 라돈은 불활성 기체이므로 땅속에서 쉽게 이동하여 지표 공기 중으로 방출이 일어난다. 일명 토론이라고도 불리는 Rn-220은 반감기가 짧아 이렇게 공기 중으로 나오는 양이 Rn-222에 비해 매우 작다. 그래서 통상 라돈이라고 말할 때는 Rn-222를 지칭한다.

라돈의 발생원이 위와 같으므로, 정도의 차이는 있지만 공기 중의 라돈은 지상의 어느 곳에서나 존재한다. 어떤 지역의 지각(암석이나 토양) 중에 우라늄의 함량이 많은 곳은 라돈가스의 방출이 많을 것임을 알 수 있다. 공기 중으로 방출되는 라돈가스의 양이 많으면 공기 중 라돈과 라돈이 붕괴하여 생성되는 라돈 딸핵종의 농도가 증가하게 된다. 라돈은 지반뿐만 아니라 건축자재, 상수, 취사용 천연가스 등을 통해서 실내로 들어오지만 일반적으로는 약 80%가 지반의 토양으로부터 방출된 것이다. 특히 환기상태가 나쁜 지하 공간에는 더욱 이 문제가 두드러진다.

이러한 라돈은 무색, 무취의 특성을 가지고 있다. 표준상태에서의 밀도가 9.73g/L로 자연계에서 가장 무거운 기체이다. 원자수가 0이며 He, Ne, Ar, Kr, Xe과 같이 화학적으로는 불활성 가스이다. 그러나 van der Waal's force 결합(질량에 의한 인력)에 의해 물, 페놀, 톨루엔 등과 clathrate 화합물을 이루거나 Rn·6H<sub>2</sub>O, RnF<sub>4</sub>의 결정격자 속에 원자로 존재하기도 한다. 또한 물이나 액체에 잘 녹으며 온도가 증가함에 따라 용해도는 떨어지는 경향을 가진다. 무기 젤(inorganic gel)이나 유기물로

이드(organic colloid) 등에 흡착이 잘 된다. 활성탄(activated coal)은 Rn 흡착력이 가장 좋은 물질로 알려져 있다. 온도가 350℃ 이상인 경우, 활성탄에 흡착된 Rn은 방출되어 없어진다고 알려져 있다.

확산에 의한 Rn의 이동은 유체투과율이 10<sup>-7</sup>cm<sup>2</sup>이하인 곳에서 지배적이며, 대류 이동은 유체투과율이 10<sup>-7</sup>cm<sup>2</sup> 이상인 곳에서 지배적이다. 전형적인 건조매질의 평균공극률을 0.3정도로 가정할 때 Rn의 확산길이는 1m정도이며 water-saturated된 매질에서는 1cm정도이다. 물에서의 Rn의 확산은 공기 중의 100분의 1 수준이다. 공극이 물로 채워진다면 확산이동거리를 감소시키며 증가된 토양공극의 수분은 토양의 유효가스 투과율을 감소시켜 토양에서의 대류이동에 영향을 끼친다. 물에 의해 포화될 경우 모든 토양가스의 모든 대류이동은 멈추게 된다.

라돈 딸핵종은 Rn-222가 3.8일의 반감기로 붕괴하여 생성된 Po-218로부터 Pb-206(안정된 보통의 납)에 이르는 연쇄붕괴반응이 계속 일어난다. 이 때 만들어지는 Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214와 같은 입자상의 방사성 핵종들을 라돈 딸핵종이라 한다. 그러나 방사선 피폭의 측면에서는 반감기가 긴 Pb-210이하는 방사능이 극히 작아 무시할 수 있다. 또 중요 관심사인 폐암 유발 위해도가 작은 베타 방사선을 방출하는 핵종(예 : Pb-214)과 생성확률이 1%도 안 되는 핵종 (At-218)은 무시할 수 있다. 따라서 라돈 딸핵종이라 하면 알파 방사선을 방출하는 Po-218(반감기 3.04분), Pb-214(반감기 26.8분), Bi-214(반감기 26.8분), Po-214(반감기 1.64×10<sup>-4</sup>)와 같은 네 핵종으로 범위를 좁혀서 생각할 수 있다. 평형상태에서의 라돈 및 딸핵종의 방사능 농도의 비는 일반적으로 Rn-222 : Po-218 : Pb-214 : Bi-214 = 1.0 : 0.9 : 0.7 : 0.6을 유지한다. Po-214는 반감기가 1.64×10<sup>-4</sup>초로 매우 짧기 때문에 항상 Bi-214와 동일한 방사능 농도를 갖는다. 즉, 라돈 딸핵종 각각의 방사능 농도는 항상 라돈 방사능 농도보다 작게 나타난다. 라돈 딸핵종은 먼지 형태로 공기 중에 떠돌거나 어떤 물체의 표면에 흡착되기도 한다. 공기 중에 떠다니는 이러한 라돈 딸핵종을 흡입하면 폐에 흡착이 되어 딸핵종이 방출하는 알파 방사선 피폭으로 인해 장기적으로는 폐암을 유발할 수 있는 것으로 보고 있다. 라돈가스 자체는 방사성 가스이지만 불활성이므로 사람이 호흡하더라도 폐

에서 흡수되지 않고, 다시 방출되기 때문에 그에 따른 위험도는 작다. 라듐, 라돈과 라돈딸핵종의 붕괴도식은 Fig. 1과 같다.

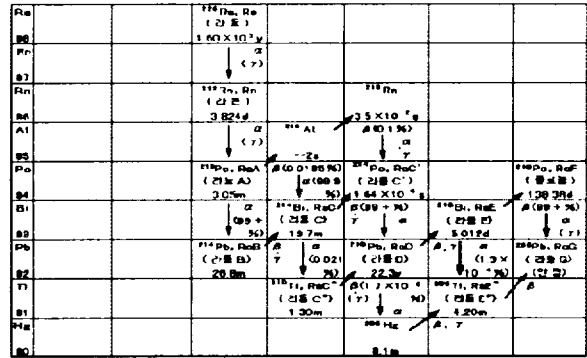


Fig. 1 Decay scheme of Ra-226

2.3 방사평형

방사성 핵종이 연속적으로 붕괴하고 있을 때 모핵종의 반감기가 딸핵종의 반감기보다 많이 길면 어떤 일정시간 경과 후 방사능과 원자수의 비가 일정해진다. 이것을 방사평형이라 한다. 어떤 방사성 핵종 A가 붕괴하여 생성되는 딸핵종 B도 방사성핵종이어서 그것이 붕괴하여 안정핵종C를 만들 때의 관계식은 다음과 같이 쓸 수 있다. 모핵종A는 붕괴해서 감소하므로 식(1)로 표현된다.

$$N_A = N_{0A}e^{-\lambda_A t} \tag{1}$$

딸핵종B는 모핵종A에서 λ<sub>A</sub>N<sub>A</sub>의 속도로 생성됨과 동시에 자신은 -λ<sub>B</sub>N<sub>B</sub>의 속도로 줄어든다. 즉 딸핵종B의 생성속도는 식(2)이 된다.

$$\frac{dN_B}{dt} = \lambda_A N_A - \lambda_B N_B \tag{2}$$

식(2)를 정리하여 풀면 식(3)이 구해진다. 식(3)은 처음부터 존재했던 딸핵종의 붕괴를 나타낸다.

$$N_B = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_{0A} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) + N_{0B} e^{-\lambda_B t} \tag{3}$$

이때, 최초(t=0)에는 딸핵종이 존재하지 않았다고 하면, N<sub>0B</sub>e<sup>-λ<sub>B</sub>t</sup> = 0 이므로 식(4)이 된다.

$$N_B = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_{0A} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \tag{4}$$

$T_A \gg T_B$ ,  $\lambda_A \ll \lambda_B$ 일 때, 여기서  $\lambda_A$ 가 대략 0이고, 방사평형관계의 시간 간격 내내 모핵종의 붕괴가 뚜렷하지 않다. 오랜 시간 후에 딸핵종의 방사능은 모핵종의 방사능과 같아진다. 이것을 방사 연속평형이라 한다. Fig. 2에서 보듯이  $\lambda_B - \lambda_A = \lambda_B$ 가 되므로 방사평형에 도달하게 되면 딸핵종의 방사능과 모핵종의 방사능은 같아진다. 딸핵종을 제거한 후 모핵종으로부터 딸핵종이 생성될 때 딸핵종의 방사능은 식(5)과 같이 구할 수 있다.

$$A_2 = \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{01} (1 - e^{-\lambda_2 t}) = A_{01} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (5)$$

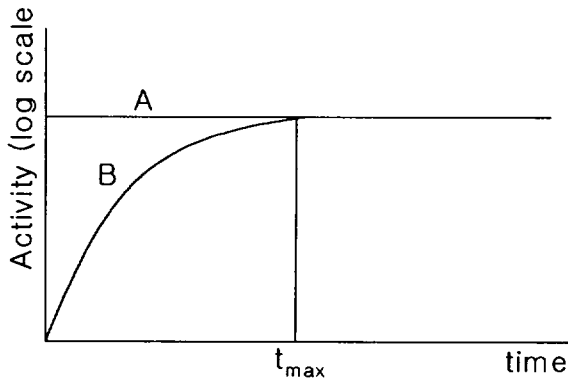


Fig. 2 Buildup of daughter activity when  $T_{1/2}(d) \ll T_{1/2}(p)$

$T_A > T_B$ ,  $\lambda_A < \lambda_B$ 일 때, 딸핵종의 방사능은 증가한다. 결국 모핵종의 방사능을 초과하면서 최대 값에 도달하고 그 이후에는 모핵종의 붕괴에 따른다. 이 때의 모핵종과 딸핵종과의 관계를 방사일시평형이라고 한다(Fig. 3).

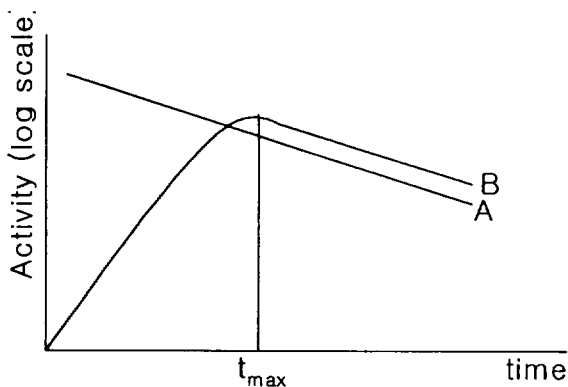


Fig. 3 Activity versus time illustrating transient equilibrium

## 2.4 검출효율

### 1) 피크효율(peak efficiency)

실험 물리학에서는 피크효율이 기기 응답과 측정된 물리량 값 사이의 비율로 정의된다. 광자 분광계에서 물리량은 고유에너지의 광자 방출 비율이고, 측정된 양은 총 계수율 또는 피크 계수율 중 하나이다. 이에 대응하여, 총 효율  $\epsilon_t$ 와 피크효율(peak efficiency)을 구별할 수 있다. 제한된 다른 방법이 없는 한 전체 에너지 피크 효율(full energy peak efficiency)  $\epsilon$ 은 식(6)에 나타나 있다. 가끔, 고 에너지에서 단일(single-) 또는 이중 이탈 피크 효율(double-escape-peak efficiency)은 측정에서  $\epsilon$ 의 역할을 담당한다. 즉, 이탈 피크(escape-peak) 높이는 전체 에너지 피크(full-energy peak)를 초과하는 경우 또는 이탈 피크(escape peak)가 나머지의 전체에너지 피크(full-energy peak)를 덮어 쓸 때이다.

전체 에너지 피크 효율(full-energy-peak efficiency)은 식(6)으로 정의된다. 이 때  $n(E)$ 은 에너지 E에 대응하는 피크의 계수율(피크에서 계수된 수를 측정시간으로 나눈 것)이고,  $R(E)$ 은 선원으로부터 방출된 에너지 E의 광자들의 비율일 때이다.

$$\epsilon(E) = \frac{n(E)}{R(E)} \quad (6)$$

이 효율(efficiency)은 고유 선원 - 검출기의 Geometry와 특유한 피크 해석 절차와 관련이 있다(검출기의 특성이 아니다). 가끔 효율은 검출기에 대응되는 "유효한" 입체각과 검출기의 고유 효율(intrinsic efficiency),  $\epsilon_{in}$ 인 두 가지 요소의 형태로 논의된다. 고유 효율은 피크의 계수치와 검출기 표면에서 부딪치는 광자들의 수로 이해된다. 이 인수분해는 정해진 측정 geometry들에서는 유효하지만, 이 고유 효율이 입사된 광자들의 지향적인 분포에 의존하기 때문에 일반적으로는 적용할 수 없다.

에너지 E에서 감마선에 대해 방출 비율  $R(E)$ 은 절대측정 또는 선원의 방사능 A 그리고 알고 있는 방출 확률  $p(E)$ 을 알고 있으면 식(7)으로 주어진다.

$$R(E) = A \cdot p(E) \quad (7)$$

### 2) 에너지 내삽법

교정선원을 사용해서 수종의 에너지에서의 검출기

의 효율은 측정한 후 전 에너지 영역에 걸친 검출기의 효율을 기술한 이들 측정점에 곡선을 적용시키는 것이 유용하다. 문헌에는 여러 가지 경험식이 추천되어 있으며 Singh는 Planner형 및 동축형 게르마늄 검출기의 양쪽 모두에 대해서 이 식의 타당성을 검토하였다.

검토된 Planner형 검출기에 대해서 Mowatt가 처음 제안한 식은 60keV~1836keV 사이의 여러 다른 검출기의 감마선에 대한 전 에너지 피크 효율(full energy peak efficiency)을 아주 좋게 표현할 수 있게 해주었다. 이 식은 다음과 식(8) 같이 쓸 수 있다.

$$\epsilon = \frac{K[\tau + \sigma Q \exp(-RE)]}{\tau + \sigma} (1 - \exp[-P(\tau + \sigma)]) \quad (8)$$

여기서,  $\tau$ 는 에너지 E에 대한 게르마늄의 광전 흡수 계수이고,  $\sigma$ 는 에너지 E에 대한 컴프턴 흡수 계수이며, K, Q, R, P는 검출점에 적용시킨 파라미터이다.

동축형 검출기의 응답에 적용 시키는 데에는 다른 실험 관계식이 필요하게 된다. McNelles와 Campbell에 의해서 처음 제안된 8파라미터 함수는 a가 상용파라미터를 나타내는 식(9)으로 주어진다.

$$\epsilon = \left(\frac{a_1}{E}\right)^{a_2} + a_3 \exp(-a_4 E) + a_5 \exp(-a_6 E) + a_7 \exp(-a_8 E) \quad (9)$$

어떤 경우에는 마지막 항을 생략해서 6개의 실험 파라미터만을 이용해 적용시킬 수 있다.

식(9)은 여러 가지 동축형 검출기에 대해서 160-598keV의 에너지 범위에서 검토한 결과를 1% 또는 2%이하의 편차로서 실험 데이터에 적용시킬 수 있다.

만일, 근사적인 적용이 약 100keV이상의 제한된 에너지영역에 필요하게 될 경우,  $\ln \epsilon = a + b \ln E$ 로 나타내는 2-파라미터 식은 가끔 더욱 복잡한 적용함수를 나타내기 위해서 적절한 정밀도로서 대치할 수 있다. 여기서는 2-파라미터 식을 이용하였다.

### 3. 실험장치와 방법

Fig. 4는 본 실험에서 사용된 실험 장치를 간략하게

구성도로 나타낸 것이다. ①은 반도체검출기, 전치증기로 구성된 HPGe 검출기를 나타낸 것이다. ②는 고전압 공급 장치와 증폭기로 구성된 NIM(Nuclear Instrument Module) 전자 장비를 나타낸 것이다. ③, ④는 스펙트럼 분석용 소프트웨어인 MAESTRO-32가 설치된 컴퓨터이다.

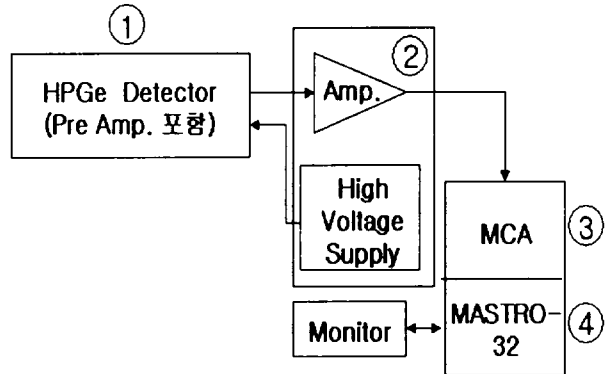


Fig. 4 Schematic block diagram of experimental apparatus

#### 3.1 HPGe 반도체 검출기

감마선 분광학에서 필요한 것으로서 큰 유감체적을 가진 검출기를 생산하는 데에는 여러 가지 방법이 사용된다. 보통 원통형 또는 동축형 검출기로 많이 제작된다. 이 경우에 전극 중 하나는 긴 게르마늄 원통형 결정체의 원통 표면 외부에서 제작된다.

두 번째 원통의 접촉은 결정의 중심을 제거하여 원통내부의 표면에 접촉시켜 둠으로써 마련된다. 결정은 축 방향으로 길게 만들 수 있기 때문에, 훨씬 더 큰 유감체적이 400cm<sup>3</sup>까지 생성될 수 있다.

Closed-ended coaxial 검출기는 중앙의 핵심 부분을 제거한 것이며, 외부 전극은 원통형 결정의 평탄한 끝을 넘어서 확장시킨 것이다(Fig.5 참조). 고순도 게르마늄 검출기를 상업적으로 만드는 대부분의 제작자들은 전면의 표면에서의 전류의 누출을 다루는 복잡성을 피하기 위하여 참 동축형 구조 전반에 걸쳐서 끝이 닫힌 동축형 검출기를 선택한다.

중앙의 양공을 앞면의 표면에도 가까이 근접시키는 것은 field lines(장선)를 가능한 지름이 되도록 유지해 주는데 도움이 되며, 또 일부 제조자들은 낮은 장의 영역을 제거하는데 도움이 되도록 결정과 양공의 앞면의 가장자리를 둥글게 한다(Bulletizing이라 함.).

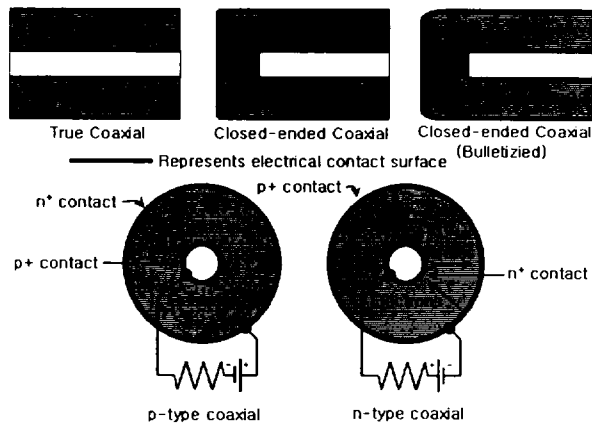


Fig. 5 At the top are shown the three common shapes of large-volume coaxial detectors.

동축형 HPGe 검출기는 튜브의 중앙 양공에 외부로의 접근이 허용되는 형상이 되도록 우물형 검출기로 사용할 수 있다. 소형의 방사성 동위원소 선원은 게르마늄으로 둘러싸인 곳에서 측정하려면 이 우물에 놓을 수 있다. 그러면 검출효율은 현저히 높아질 수 있다.

동축형 검출기에서 반도체 접합을 형성하는 정류 접촉은 원리적으로는 이 결정의 내부 표면이나 또는 외부표면 중의 어느 곳에도 놓을 수 있다. 그 결과 전기장의 조건은 아주 다르게 된다. 만일, 정류접촉이 외부 표면에 있는 경우라면, 결핍층은 전압이 결핍 전압에서 내부 양공표면에 도달할 때까지 증가됨으로써 내부로 성장하게 된다. 만일 내부표면이 정류접촉을 갖는 경우라면 결핍영역은 외부로 성장하게 되고, 검출기 체적을 완전히 결핍시키는데 상당히 큰 전압을 필요로 하게 된다.

원통형 결정의 첫 번째 외부영역(체적의 대부분이 놓여지는 곳)에서의 첫 번째 경우(정류접촉이 외부 표면에 있는 경우)는 전압이 완전결핍 이상으로 증가됨으로써 유지된다. 이러한 이유로 인해서 제작자들은 정류접촉을 외부 표면에 정착시키는 것을 일반적으로 선택한다. 특별히 외부접촉은 p형에 대해서는 n<sup>+</sup>이고 n형 HPGe에 대해서는 p<sup>+</sup>가 될 것이다. 내부표면은 반대 유형의 방해접촉으로서 마련된다.

작은 띠허격(0.7eV) 때문에 어떤 유형의 게르마늄 검출기의 실온에서의 조작은 결과에 영향을 주게 될 다량의 열적으로 유도된 누설전류로 인해서 불가능해진다. 그 대신에 게르마늄 검출기는 누설전류가 연관된 잡음이 이들 검출기의 훌륭한 에너지 분해능을 손

상시키지 않는 점까지 감소시켜 냉각시키지 않으면 안 되기 때문에 일반적으로 액체질소의 저장소는 검출기에 열 접촉이 유지된 절연적 Dewar의 사용을 통해서 77K로 감소시켜야 한다.

Ge(Li)검출기의 경우에는, 실온에서 급속히 발생될 수 있는 Drift된 Lithium의 파괴적인 재분포를 방지하기 위해 계속적으로 저온상태를 유지해야 한다. HPGe 검출기에서는 Lithium drifting은 제거되어야 하고 사용 중에 검출기는 실온까지 보온될 수 있다.

제조기술은 현재 검출기가 끝없는 온도의 순환에도 잘 견딜 수 있는 점까지 발전되었다. 이러한 동작상의 장점은 고순도 게르마늄 검출기가 Ge(Li)검출기를 대체하게 된 주요한 원인인 것이다.

검출기는 결정과 주변 공기간의 열전도를 막기 위해 완전한 진공상태의 Cryostat장치에 넣어 두어야 한다. Cryostat은 보통 제조업자에 의해서 진공배기한 후 봉한다. Pumping port는 고온열처리(High-temp. annealing)와 같은 특수한 동작을 기능적으로 수행하기 위해 제공될 수도 있다.

얇은 입장은 감마선이 게르마늄으로 입사되기 전에 감마선의 감쇠를 최소화하는 결정 부근에 위치할 수 있다. Cryostat은 특수한 가려막기 또는 기타 응용 조건에 맞게 수평방향 내지 수직방향을 포함한 여러 가지 방향에서 액체질소를 Dewar에 고정시킬 수 있다. 일주일동안 한번 이상 Dewar에 액체질소를 재보급하지 않고 끝낼 수 있도록 용량이 약 30L 정도는 되어야 한다.

Dewar의 크기와 중량은 검출기 그 자체의 것보다는 훨씬 더 크기 때문에 휴대용 조작이 어렵다. 그러한 응용 때문에 일부 제조업자들은 취급시간이 더 제한되는 소형 Dewar를 만들고 있다. 밀폐된 검출기 캡슐은 같은 게르마늄 결정이 많은 다른 Cryostat-dewar 형태에 쉽게 부착될 수 있도록 이용할 수 있다.

HPGe 검출기를 액체질소 온도에서 조작하는 것이 편리함에도 불구하고, 어떤 응용 분야에서는 검출기 온도를 이 명목상의 77K값 이상으로 올릴 수 있게 하는데 더욱 편리할 수도 있다. 여러 연구를 통해 동축형 검출기의 성능이 절대온도가 약 130K로 상승할 때까지 견디지 못한다는 사실이 증명되었다.

액체질소 냉각에 사용될 수 있는 몇 가지의 선택적인 방법들이 있다. 기계적인 닫힌 사이클(Closed

cycle) 냉각장치가 50 -60K 정도로 낮게 검출기를 냉각시킬 수 있음을 입증해주었으나, 기계적인 진동에 기인된 전자 잡음을 막을 수 있게 주의를 기울이지 않으면 안 된다.

전치증폭기는 현대 HPGe 장치에서 cryostat 장치의 일부로서 보통 합병된다. 전치증폭기를 가능한 한 진기용량을 최소가 되게 검출기 근처에 놓는 것은 항상 장점이 있다. 전치 증폭기의 입력단계는 보통 전자 잡음을 감소하는데 검출기와 더불어 또한 냉각된다. 또한, 전자 상자가 없는 cryostat의 외부에서 가려막기를 아주 잘 맞게 한다거나 또는 컴프턴 억제 장치(Compton suppression system)를 유지하는 데에도 약간의 장점이 있다.

실험에서 사용된 반도체검출기의 사양은 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of HPGe Detector

Specification	Type
Model	(Canberra) No. GC1520
Rel. Efficiency	15%
Peak/Compton	40 : 1
Resolution	1.71keV(FWHM ; CO-60 : 1.33MeV)
Cryostat Description	7500SL
Geometry	Closed ended coaxial
Diameter	47mm
Length	41mm
Active area facing window	17.9cm <sup>2</sup>
Distance from window	5mm
Recommended Bias Voltage	(+)4000V dc.

### 3.2 실험 방법

첫째, 상수도 수원 시설용량이 일당 15,000m<sup>3</sup>이 되는 곳이 있는 주위의 용천수를 선택했다. 그래서 시료 채취 지역을 제주시 3곳과 서귀포시, 북제주군, 남제주군은 각각 1곳씩 총 6곳을 선택했다.

둘째, 자연방사선에 의한 영향을 최소화하기 위해 검출기 주변을 두께 100mm의 납벽돌을 이용하여 차폐하였고, 측정용기 지지대를 직접 제작하고 검출기 주위에 설치하여 측정용기와 검출기 사이의 기하학적

조건의 변화를 최소화하도록 제작하였다.(Fig. 6)



Fig. 6 sample support was made and the 100mm lead bricks were shielded to HPGe

셋째, 검출기의 에너지 교정은 Cs-137, Co-60 핵종들로부터 방출되어지는 단일감마선 에너지를 이용하여 수행하였고, 검출효율의 교정은 Ra-226 표준용액을 사용하여 수행하였다. Ra-226 표준용액은 1.4N의 HCl용액으로 희석하여 Marinelli beaker용기(용량 : 1000mL)에 채워 실리콘으로 밀봉하였다. 제작된 표준용액의 총 방사능량은 1995년 4월 12일 기준일 현재 219.34Bq이다. 한편, 측정에 앞서 Ra-226과 Rn-222의 방사영속평형관계를 고려하여, 제작된 Ra-226표준용액은 밀봉한 뒤, 약 60일 동안 방치한 후에 72,000초 동안 측정하였다.

(Fig. 7)

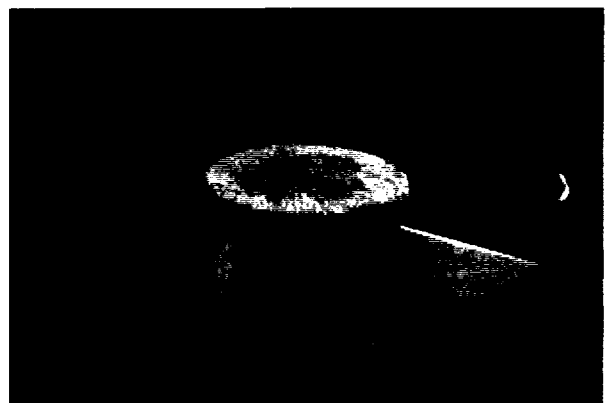


Fig. 7 Ra-226 standard solution was made and sealing with Silicone

넷째, 실험에 사용된 물시료는 채수와 동시에 폴리에틸렌재질로 제작된 Marinelli beaker(용량 : 1000ml)

에 각각 채워 넣었다. 라듐가스의 방출을 막기 위하여 물을 beaker에 채워 넣은 후에 실리콘으로 용기의 주위를 완전히 밀봉하였다. 물시료의 측정은 Rn-222와 Pb-214와의 방사영속평형관계를 고려하여 채수 후에 약 4시간이 경과한 뒤에 시작하였고, 각 물시료마다 72,000초 동안 측정했다.

### 4. 스펙트럼 획득과 분석

이 실험에서 용천수 중의 Rn-222 방사능 측정은 감마선 방출 확률이 크고 Rn-222의 딸핵종인 Pb-214의 351.9keV 감마선 피크를 측정함으로써 이루어졌다. 라듐 붕괴 계열에 의해 생성되어지는 Rn-222 핵종 그 자체는 감마선을 방출하지 않지만 라듐 붕괴 계열의 딸핵종인 Pb-214와 Bi-214들로부터 다수의 감마선들이 방출된다. 이들 핵종으로부터 방출되어지는 감마선 에너지의 방출확률을 Table 2에 나타냈다.

Table 2. Gamma-ray energy and Emission probability emitted from the daughter nuclides of Rn-222 and Ra-226

Energy(keV)	Emission probability(%)	Nuclide
186.210	3.51(6)	Ra-226
241.979	7.12(11)	Pb-214
295.207	18.2(3)	Pb-214
351.925	35.1(4)	Pb-214
609.318	44.6(5)	Bi-214
768.364	4.76(7)	Bi-214
934.060	3.07(4)	Bi-214
1120.285	14.7(2)	Bi-214
1238.110	5.78(7)	Bi-214
1764.515	15.1(3)	Bi-214

#### 4.1 반도체검출기의 Peak Efficiency

위의 실험에서 Ra-226의 감마선 스펙트럼을 획득한 것을 Fig. 8에 나타내었다. 측정된 Ra-226 표준용액의 감마선 스펙트럼에서 스펙트럼 분석용 소프트웨어인 MASTRO-32를 이용하여 피크면적을 산출하였다. 피크검출효율은 얻어진 피크면적과 각 감마선에 대한

방출확률을 사용하여 (6), (7)식의 관계로부터 결정되었다. 그리고 Ra-226의 각 에너지별 피크면적, 계수와 계산된 피크효율을 Table 3에 표시하였다. 그리고 Peak efficiency값을 내삽 방법으로 얻기 위해 감마선 에너지( $E_\gamma$ )와 Peak efficiency( $\epsilon_\gamma$ )의 함수로서 (10)식을 사용하여 얻어진 Ra-226 표준용액의 Peak efficiency값을 fitting하였다. 여기서 a와 b는 fitting 변수이며, 이들 변수는 a=0.237 및 b=-0.738로 결정되었다.

$$\ln \epsilon(E_\gamma) = \ln a + b \ln E_\gamma \tag{10}$$

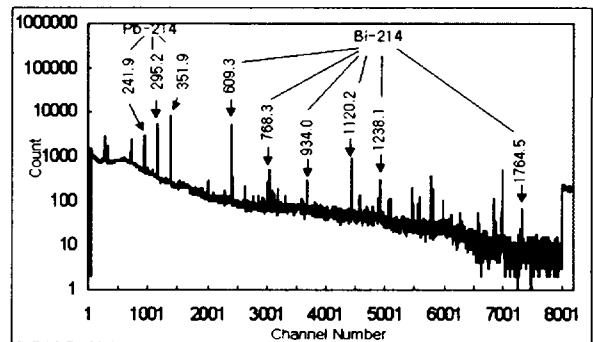


Fig. 8 Gamma spectrum for Ra-226 standard solution measured with HPGe(Relative efficiency is 30%)

Table 3. The peak area, count rate, peak efficiency and gamma-ray emitted from the daughter nuclide of Rn-222 by the decay of Ra-226

Energy (keV)	Peak Area	Count Rate (cps)	Peak efficiency (%)
241.979	13833(226)	0.040	0.00413235
295.207	16135(174)	0.0779	0.002652755
351.925	24817(215)	0.12	0.001377605
609.318	18265(187)	0.0754	0.000925586
768.364	3291(121)	0.00699	0.004462131
934.060	1915(131)	0.00403	0.006854849
1120.285	6474(109)	0.0123	0.001292454
1238.110	2455(151)	0.00447	0.003150128
1764.515	4864(85)	0.007	0.000953076

Fig. 9을 보면 점선은 (6), (7)식의 관계식을 이용하여 구한 Ra-226 표준용액의 Peak efficiency값이며, 실선은 fitting함수에 대한 Peak efficiency곡선을 나타낸 것이다.



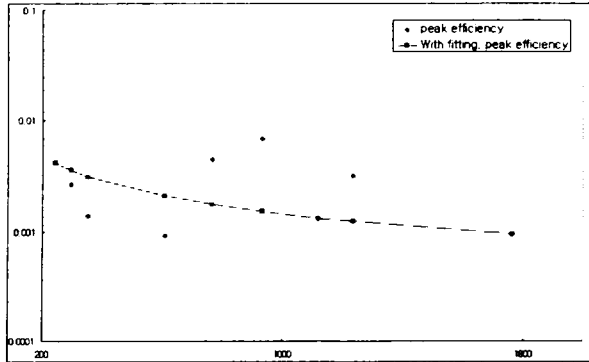


Fig. 9 The peak efficiency points measured with Ra-226 standard solution and peak efficiency curve calculated from Fitting function

4.2 물시료의 Rn-222 방사능 결정

감마선 분광분석법에 의한 용천수 중의 라돈 농도는 물시료 측정스펙트럼에 있어서 라돈 딸핵종 Pb-214의 351.9keV 감마선 피크에 대한 검출기의 Peak efficiency 값을 알면, 식(11)을 이용하여 구할 수 있다. 물시료들의 측정스펙트럼은 Fig. 10~15까지 나타나 있다.

$$A = \frac{n_i}{I_\gamma \cdot \epsilon_\gamma} \quad (11)$$

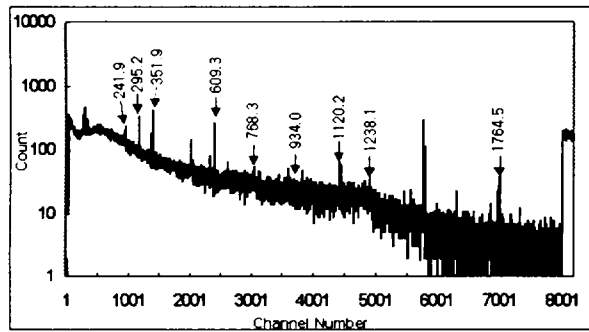


Fig. 10 Gamma spectrum for Sample 1 (Jeju-si Byeoldo-bong)

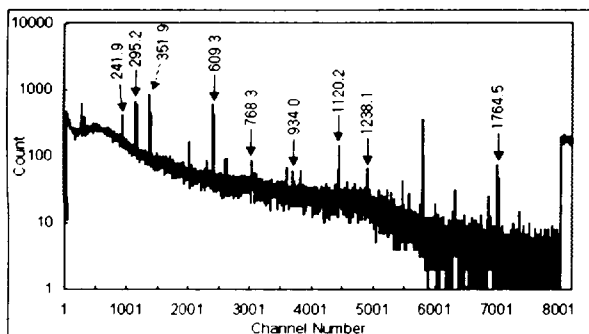


Fig. 11 Gamma spectrum for Sample 2 (Jeju-si Do ryeon)

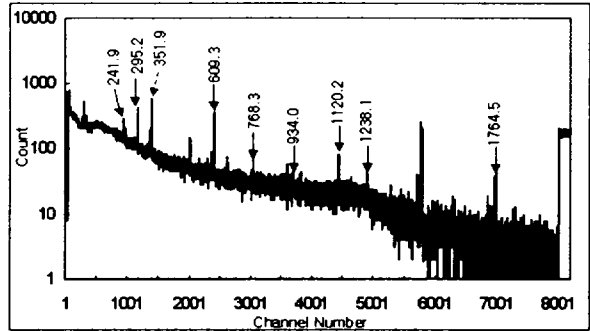


Fig. 12 Gamma spectrum for Sample 3 (Jeju-si Weol san)

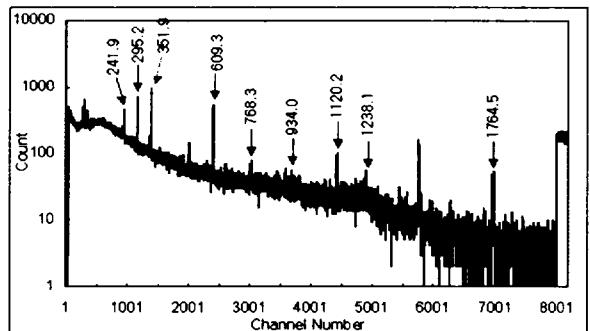


Fig. 13 Gamma spectrum for Sample 4 (Seogwipo-si Kang jeong)

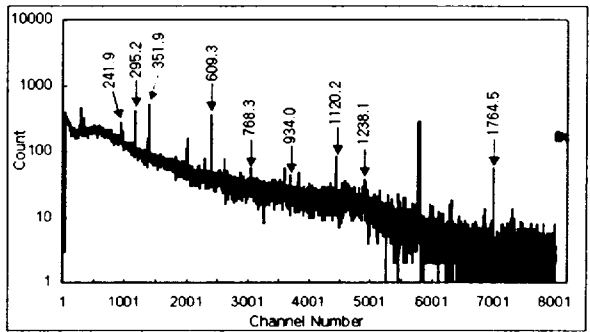


Fig. 14 Gamma spectrum for Sample 5 (Bukjeju-gun Ong po)

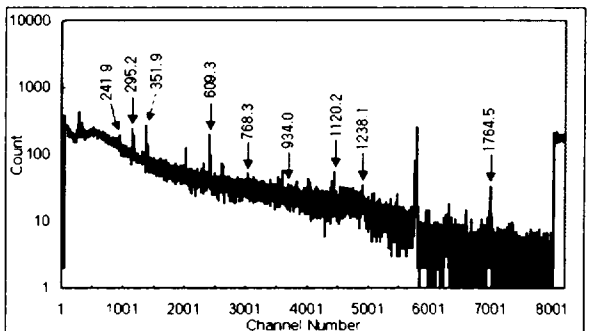


Fig. 15 Gamma spectrum for Sample 6 (Nemieju-gun Seo lim)

따라서 용천수 중의 Rn-222의 방사능은 라돈 딸핵종 Pb-214의 351.9keV 감마선 에너지에 대해 내삽 방법으로 얻어진 Peak efficiency값과 피크 계수율로부터 계산되었으며, 이렇게 해서 각 지역에서 얻어진 용천수의 Rn-222 방사능에 대한 결과를 Table 4에 나타내었다.

**Table 4. Count rates of peak and Activities for 351.9keV gamma-ray energy measured with samples of region's spring-water**

각 지역	Count rate of peak[cps]	Activity[Bq/L]
별도봉	0.00601	5.48
도련	0.01237	11.27
월산(이상 제주시)	0.00802	7.31
서귀포시 강정	0.01355	12.34
북제주군 옹포	0.00723	6.59
남제주군 서림	0.00381	3.48

## 5. 결 론

본 실험에서는 용천수 중의 Rn-222 방사능을 HPGe 검출기를 사용하여 감마선 분광분석법에 의한 방법으로 측정하였다. 본 측정으로부터 얻어진 용천수 중의 Rn-222 방사능은 지역별로 제주시 별도봉, 도련, 월산은 각각 5.48Bq/L, 11.27Bq/L, 7.31Bq/L이고, 서귀포시 강정은 12.34Bq/L, 북제주군 옹포는 6.59Bq/L, 남제주군 서림은 3.48Bq/L로 나왔다. 2002년도 지하수 중 방사성물질 함유 실태 조사결과의 제주도 지역인 북제주군 애월읍 봉성리, 남제주군 대정읍 상모리, 성산읍 수산리인 경우 각각 1.85Bq/L, 5.18Bq/L, 9.99Bq/L이었는데, 실험결과와 조사결과를 비교하였을 때 큰 차이가 없었다. 그러나 라돈 농

도는 시간, 계절, 기상조건 및 위치 등의 환경요인에 따라 그 변화가 매우 심하기 때문에 보다 정확한 평가를 위해서는 장기간의 많은 측정 데이터가 필요하다.

결과적으로, 본 실험에서 채수된 물시료는 복잡한 시료의 전처리 과정 없이 HPGe 검출기를 사용하였기 때문에 신속, 간편하게 용천수의 Rn-222방사능을 측정할 수 있었다.

또한 음용수 중 라돈 농도가 U.S. EPA 2002년도 잠정기준이 4000pCi/L(≒148Bq/L)임을 감안할 때 제주도의 각 지역에서 측정되었던 라돈 양은 이에 훨씬 못 미치는 수치이다. 아직 국내에는 라돈 기준치가 없으나 미국 잠정기준과 비교했을 때 제주도 내의 용천수는 라돈에 대한 식수로서의 안전성이 평가되었다.

## 6. 참 고 문 헌

- 김경화 외. 1997. HPGe 검출기를 사용하는 감마선 분광분석법에 의한 지하수중의 Rn-222 방사능 결정, Sae Mulli, Vol. 37, 8-11
- K. Debertin and R. G. Helmer, 1988. Helmer, Gamma- and X-ray Spectrometry with Semiconductor Detectors. North Holland, New York. 205, 206, 211, 364
- Glen F. Knoll. 2000. Radiation Detection and Measurement. New York. 408-409, 413-414, 448-449
- 국제 방사선 방호 위원회. 가정과 직장에서의 라돈-222에 대한 방호. 한양대학교 부설 방사선종합연구소. 2-3
- 이재기. 음용수 중 방사능의 위해와 기준. 한양대학교 부설 방사선종합연구소. 2
- 국립환경연구원 물환경연구부. 2003. 2002년도 지하수 중 방사성물질 함유실태 조사결과. 환경부
- 제주도. 1999. 제주의 물 용천수. 제주도. 34-35