

부산 금정구지역의 지하수에 포함된 라돈농도 변화 연구

조정숙*, 이효민†, 김선웅†, 김진섭†

*부산대학교 물리학과, †부산대학교 지질환경과학과

2012년 6월 12일 접수 / 2012년 7월 25일 1차 수정 / 2012년 8월 16일 2차 수정 / 2012년 8월 17일 채택

알파, 베타핵종의 분리측정에 효과적인 저준위 액체섬광계수기를 이용하여 부산 금정구의 10지점을 선정하여 1년 동안 지하수 내 라돈농도의 변화를 측정하였다. 액체섬광계수기의 최적화된 측정방법을 결정하기 위하여 라듐-226의 표준선원을 이용하여 효율과 백그라운드의 관계를 나타내는 FM (Figure of Merit) 값이 최대가 되는 PSA 준위가 100에서 110범위에 있음을 확인하였다. 결정된 PSA 준위에서 측정된 부산 금정구 지역의 각 암석 분포에 대한 지하수 내 라돈의 평균 농도를 비교해보면, 흑운모화강암 지역은 $191.39 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$, 미문상화강암 지역은 $141.88 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$, 아다멜라이트 지역은 $92.94 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$, 안산암 지역은 $35.35 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ 순으로 나타났다. 조사지역의 10개 지점에서 1년간 정기적으로 측정된 라돈농도의 변화 양상을 살펴보면, 뚜렷하게 구분되는 특징적 계절적 변화양상이 나타나지 않고 있다. 지하수 내 라돈 농도와 수온, 기온, 대기압, 강수량의 상관성을 알아본 결과 각각에 대한 뚜렷한 연관성은 찾을 수 없었으며, 하나의 변수에 대해서가 아니라 보다 복합적 요인과 작용에 의해 변화한다고 판단된다.

중심어: 라돈-222, 지하수, 액체섬광계수기, RAD7, 환경적요인, 부산지역

1. 서론

라돈-222 핵종은 자연 방사성원소의 3계열 중 우라늄-238을 시조핵종으로 하여 마지막에 납-206으로 변하는 우라늄계열의 원소 중 하나로서 암석이나 토양층에서 자연붕괴로 생겨나 대수층 균열이나 공극을 통해 이동하여 지하수 중에 농축되거나 지표면으로 쉽게 방출된다.

라돈의 위험성은 라돈-222의 불활성적인 성질보다 딸핵종의 이온상태가 다른 물질에 영향을 주는 것이 문제가 된다. 이유는 붕괴 후 체내 흡입이나 장기에 흡착되어 과농집되면 질병을 유발하는 원인이 될 수 있기 때문이다. 또한 딸핵종들의 짧은 반감기로 인해 한 달 이내에 99% 이상 붕괴되어 22.3년의 반감기를 가지는 납-206으로 변하는데 이것이 인체에 축적되는 결과는 낱게 된다.

NRC (National Research Council)에서 라돈-222가 인체에 미치는 영향에 대한 연구에 의하면, 폐암으로 인한 사망자 중 흡연과 라돈-222를 동시에 흡입했을 때의 사망자가 전체의 12%를 차지하며, 그 중 실내에서 물에 의해 공기 중으로 기화된 라돈-222의 흡입과 음용수로 인한 직접적인 섭취도 무시할 수 없다는 보고를 발표하고 있다 [1]. 미국환경청(Environmental Protection Agency: EPA)과 세계보건기구(World Health Organization: WHO)에서도 라돈의 실태조사와 수질기준 및 규제치를 강화하기 위한 연구가 계속되고 있으며, 1976년 US EPA에서는 일반음용수에 대한 환경방사성 동위원소의 최대오염준위

(Maximum Contaminant Level: MCL)에 대한 음용수 규정(National Primary Drinking Water Regulations: NPDWR)을 처음으로 제안하여 1991년 개정, 2000년 다시 개정하며 그 규제치를 강화하고 있다[2].

토양 내 라돈농도와 같이 지하수 내 라돈 농도는 다양한 지질학적 및 지구화학적 요인들에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다[3,4,5,6]. 지하수 내 라돈 농도는 대수층을 구성하는 모암과 주변토양의 우라늄 및 라듐의 농도에 일차적으로 영향을 받으며, 지구조적 변형작용과 다양한 수리지질학적 변수에 의해 더욱 복잡한 변화양상을 나타낸다. 최근에는 토양과 지하수 내 라돈 이상변화를 지진 예측의 전조 현상으로 활용하고자 하는 연구들이 이루어지고 있다[7,8,9,10]. 지진과 관련된 라돈의 이상변화 현상에 의한 성공적인 지진예측을 위해서는 적절한 지하수 내 라돈의 연속측정 방법을 개발하고 시·공간적 라돈의 변화 특성을 파악하는 것이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 지하수 내 라돈 농도 변화를 지진예측을 위해 활용을 위한 예비연구의 일환으로 수행하였다. 최근에 한반도 동남부에서 지진발생 빈도가 증가하고 있음으로, 양산단층과 동래단층이 지나고 있는 부산 금정구 일대의 지하수를 대상으로 연구하였다. 금정구 일대의 암석의 종류에 따른 지하수 중 라돈 농도를 측정하기 위해 저준위 액체섬광계수기 (Liquid Scintillation Counter: LSC, Wallac社 Quantulus 1220)의 최적화 방법을 결정하였고, 그에 따라 측정기기의 최소검출방사능을 계산하였다. 정해진 방법에 따라 조사지역의 10지점을 선정하여 매달 정기적으로 측정하였다. 라돈농도 변화에 영향을 미치는 환경적 요인과의 관계를 알아보기 위해 RAD7을 이용하

책임저자 : 이효민, hmlee61@pusan.ac.kr, 김진섭, jskim@pusan.ac.kr
부산광역시 금정구 부산대학교 63번길 2, 부산대학교 지질환경과학과

여 위의 10지점 중 한 지점을 선택한 후 매일 같은 시간에 지하수 내 라돈농도, 수온, 기온, 대기압과 강수량을 동시에 연속 측정하여 상관관계를 알아보았다.

2. 재료 및 방법

2.1 측정지점

우리나라의 식수나 생활용수로 사용되고 있는 지하수는 정부에서 관리하는 민방위급수시설과 개인이 관리하는 시설로 구분되는데, 대부분 화학적 수질검사기준에 따라 공급하고 있다. 음용수로서 사용되고 있는 지하수 내 라돈농도와 환경적 요인에 따른 농도변화에 대한 연구를 위해 최근에 한반도 동남부에서 지진발생 빈도가 증가하고 있음을 감안하여, 부산지역의 북동쪽 양산단층과 동래 단층이 지나고 있는 부산 금정구 일대에 개발 사용되고 있는 심도 100m 이상 되는 지하수를 대상으로 측정지점을 선정하였다. 기반암의 종류를 고려하여 10지점을 선정하여 매달 정기적으로 액체섬광계수기를 사용하여 라돈 농도를 측정하고, 기반암의 종류에 따른 라돈 농도 변화와 시간적 변화 특성 및 요인을 분석하였다. 지하수 내 라돈 농도 연속 측정을 위해, 10개의 지하수 측정지점 중 측정·분석된 장기변화특성의 양상이 단순하고 변화폭이 적으며, 절리밀도 4단계로서 지진의 영향성이 큰 지역으로 판단된 부산대학교 내 설치된 지하수 관정에서 RAD7을 이용하여 연속 측정을 실시하였다.

2.2 액체섬광계수기

액체섬광계수기는 방사선의 들뜸 작용에 바탕을 둔 발광작용을 이용한 방사선 검출기로서 섬광체가 방사선에 에너지를 흡수하여 광자를 생성하고 전치증폭기를 포함한 광증배관에 의해 신호를 증폭시킨 후 계수기를 통해 계수하여 방사성 물질에서 방출되는 방사선 에너지 크기와 양을 측정하고 분석하는 장치이다[11,12,13]. 시료의 전처리가 간단하고 펄스의 형태 차이를 이용하여 효과적으로 분리측정이 가능한 PSA (Pulse Shape Analyzer)기능이 특징이다. PSA 준위가 높아질수록 더 많은 펄스들이 짧은 펄스들의 범주속으로 들어가게 되어 알파 스펙트럼이 베타 스펙트럼에 흡수되므로 적절한 준위설정이 필요하다.

PSA 준위를 결정하기 위해 라듐-226 표준선원(1.393±0.012 kBq/5mL : NIST) 과 3단계를 거친 증류수를 이용하여 12개의 표준물질을 조제하였다. 이렇게 조제한 표준물질 12개(3000~5500 Bq · L⁻¹의 높은 방사능 표준물질 6개와 1000 Bq · L⁻¹ 이하의 낮은 방사능 표준물질 6개)를 각각 10mL 씩 바이알에 담고 섬광액(Mineral oil scintillator : 6NE9571, PerkinElmer) 12 mL 를 혼합하여 라돈-222 생성물질을 조제하였다. 이것은 표준선원의 알파선 영역에서 구한 측정효율과 바탕시료의 계측을 통한 백그라운드 계수율을 이용하여 FM (Figure of Merit)값을 계산하여 최대가 되는 준위를 결정하는 방법인데, FM값은 측정효율을 제공하여 백그라운드로 나눈 것으로 계측기기의 효율적인 채널 설정과 성능을 나타내는 지표로 사용된다[14].

측정기기의 성능에 따른 최소검출방사능을 결정하기 위해 계측시간에 따라 알파스펙트럼의 채널에서 피크영역을 선택하여 계수율을 측정하였다. 최소검출방사능은 어떤 방사능 준위에서 시료 내 검출할 수 있는 최소방사능을 결정해 주는 개념으로서 기기의 감도 레벨(Critical Level)을 결정짓는 척도가 된다. 최소검출방사능을 결정하기 위해 다음의 식을 이용하였다[15].

$$MDA(95\%) = \frac{4.65 \left(\frac{R_B}{T}\right)^{1/2} + \frac{2.71}{T}}{60 \times \epsilon \times V} \quad (1)$$

식(1)에서 R_B 는 시료의 백그라운드 계수율이고, T 는 시료의 측정시간(분)이며, ϵ 은 알파스펙트럼의 선택한 채널에서의 측정효율이다. 그리고, V 는 시료량으로 0.01 L 를 사용하였다.

시료채취를 위한 지하수는 심도 100m 이상의 암반에서 펌프를 이용해 올린 후 고여있던 물을 5분 이상 흘러보내고, 지하수 10 mL 를 라돈기체의 손실없이 곧바로 섬광액 12 mL와 신속하게 혼합하였다. 시료채취 시 라돈의 붕괴보정을 위해 모든 시료의 채취시간을 기록하고 측정시간까지 시간보정을 해주었다. 그리고, 라돈-222의 짧은 반감기를 고려하여 시료채취 후 24시간이내 측정하였으며, 방사평형을 위해 4시간이상 방치한 후 측정하였다. 측정효율은 표준물질 조제 후 방치시간에 따른 라돈-226의 영속 방사평형을 고려하여 결정하였고, 이 때 라돈농도는 아래의 식을 이용하였다[16].

$$C = \frac{R_S - R_B}{\epsilon \times V \times 60 \times f} \quad (2)$$

식(2)에서 C 는 비방사능값(Bq/L)의 라돈농도를 말하고, R_S 는 알파선 총 피크영역에서의 시료에 대한 계수율, R_B 는 백그라운드의 계수율이다. ϵ 은 앞에서 계산한 측정효율, V 는 시료량으로 0.01 L이고, f 는 시간 보정인자로서 $\exp\left[\frac{-0.693 \times t}{3.82}\right]$ 의 값을 가지며, t 는 시료 채취일로부터 계측시간까지의 경과일을 말한다.

2.3 RAD7

주변영향을 많이 받는 라돈의 특성 상 단기적이고 연속적인 측정을 위하여 본 실험에서는 DURRIGE社 RAD7과 그의 세부장비인 RADH₂O 를 이용하였다. RAD7은 건축물 실내 및 지하 생활 공간 등의 라돈가스농도 측정이 용이하도록 제작되었으며, 1시간 이내에 EPA Action Level인 4 pCi · L⁻¹ 까지 측정가능하고, 빠른 응답 속도와 신속한 영점 조정으로 수분이내에 재측정 가능한 장점이 있다. 또, 시료채취용기에 따라 wat250, wat 40 mode를 선택할 수 있으며, 라돈 및 Thoron의 측정을 간단하게 그 래프로 출력할 수 있어 짧은 시간에 측정치를 확인할 수 있는 장점이 있다[17,18]. RAD7의 지하수측정에 사용되는 RADH₂O는 정해진 용량의 지하수에서 라돈농도를 측정할 수 있도록 표준화되어 있으며, 사용하기에 편리하도록 상용화되어 있다. RAD7은 측정모드와 세부장비에 따

라돈 농도의 연속측정도 가능하도록 제작되어 있는데, RAD AQUA는 지하수의 연속측정을 위한 세부장치로서 지하수와 연결하는 스프레이 노즐에 따라 유량을 조절할 수 있다. 스프레이노즐에 의해 지하수가 챔버에 작은 입자 상태로 존재하게 되는데, 이것은 RADH₂O의 측정시 버블링하는 것과 같은 원리이다. RAD7의 본체와 연결된 데시컨트를 지나면서 수분은 흡수되고 라돈기체는 측정 챔버 안으로 들어가면서 라돈농도를 측정하게 된다. RAD AQUA는 수온의 변화도 연속적으로 측정가능하며, 컴퓨터와 연결하여 실시간 확인 가능하다.

2.4 RAD7을 이용한 라돈농도 변화

라돈농도의 장기적인 측정을 위해 금정구 10개 지점 중 시료채취가 용이한 부산대학교 내 설치된 민방위급수용 지하수공에서 매일 같은 시간에 같은 매뉴얼을 이용하여 측정하였다. 라돈-222의 붕괴생성물 ²¹⁸Po과 ²¹⁴Po는 이온상태로서 다른 물질에 흡착이 잘되므로 챔버 내의 수분 조절을 위해 측정 시 측정기기 내부에 장착되어 있는 펌프를 이용한 purging 작업이 중요하다. 따라서, 시료채취 전 RADH₂O의 로드를 분리한 후 purging 모드로 약 10여분동안 작동하고 측정기기의 챔버 내 수분을 6% 이하로 떨어뜨린 후 측정하였다. 시료를 채취할 때는 심도 200 m 암반의 관정 속에 고여 있는 지하수에 라돈기체가 녹아있어 측정의 불확도를 높일 수 있으므로, 지하수를 3분 이상 흘려보내고 기포가 생기지 않도록 채취하였으며, 시료채취 후 30분 안에 측정하였다. 시료채취시간은 하루 중 오후 3시에서 4시사이로 고정하였는데, 이는 라돈농도의 일변화에 대한 시간이 변동요인으로 작용하지 않도록 하기 위해서이다. 동시에 환경적 요인으로 작용하는 기온, 수온, 대기압, 강수량을 측정하였다. 이 또한 같은 조건에서 환경요인과의 상관관계를 알아보기 위해서이다. 시료 측정용기는 "wat250" 모드로 하여 정해진 용량(250 mL)의 시료를 채수한 후, 5분 동안 4회 측정하였다. 6개월간의 라돈농도의 변화를 통해 수온, 기온, 대기압, 강수량과의 상관관계를 알아보았다.

3. 결과 및 논의

3.1 LSC를 이용한 측정의 최적화 방법

그림 1은 방사화학분석법에 의해 조제된 라듐-226의 표준물질에서 라돈-222가 그 붕괴생성물 핵종과 방사평형을 이룬 후의 스펙트럼을 측정된 것으로 붕괴생성물 핵종들이 채널에 따라 잘 분리되어 있음을 보여준다. 이는 액체섬광계수기의 파형분석방법에 따라 결정된 PSA 준위에 의해 측정된 것으로 채널 700-900의 영역만을 선택하여 분석하였다.

그림 2에서는 PSA 준위에 따라 얻어진 알파선의 총 피크영역에서 FM값, 측정효율, 알파입자의 분당 계수율 CPM (Counts Per Minutes), 백그라운드의 변화를 보여준다. 액체섬광계수기는 PSA 준위를 1 단위로 변경하며 측정할 수 있기 때문에 라듐-226 표준선원으로 만든 12개의 표준물질 중 비방사능 216.7 Bq · L⁻¹을 가지고 PSA 준위를 80에서 130 범위까지 1씩 바꾸면서 측정하였다. 알파

스펙트럼과 베타 스펙트럼의 효과적인 분리를 위한 척도로서의 FM값은 알파입자의 계수효율이 클수록, 또 그에 대한 백그라운드의 계수가 낮을수록 큰 값을 나타낸다.

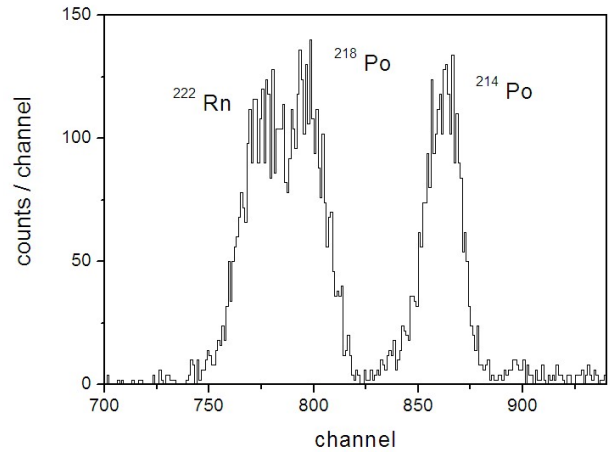


Figure 1. Energy spectrum of alpha particles using LSC.

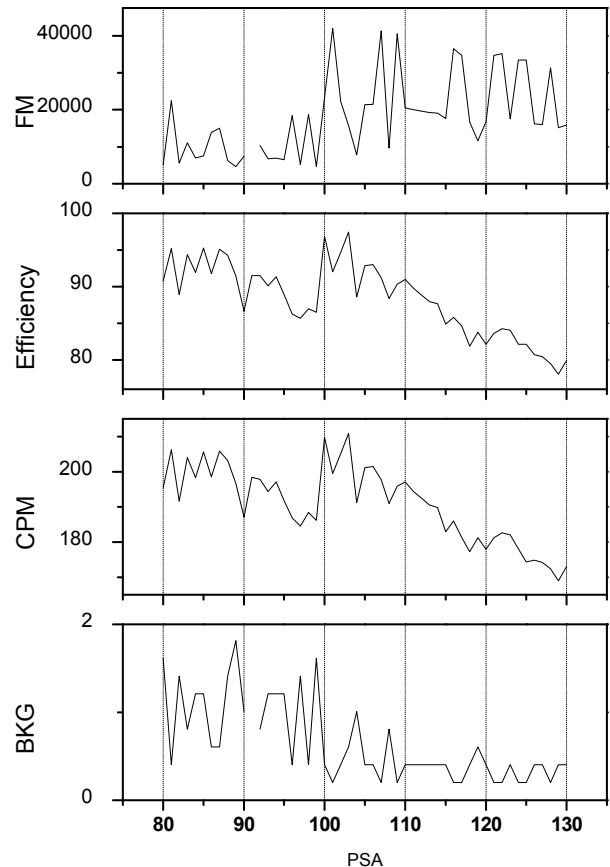


Figure 2. Optimal method of radon analysis.

이에 백그라운드의 계수율이 낮아지는 경향을 보이는 100에서 120범위 사이와 측정효율이 높게 나타나는 100에서 110범위 사이에서 FM값이 최대가 됨으로 이 구간에서 알파 스펙트럼과 베타 스펙트럼이 가장 잘 분리되었다고 할 수 있다. 이때 CPM 또한 100에서 110범위 사이에서 높은 값을 보이므로, 액체섬광계수기의 측정 최적화를 위한 값은 PSA 준위 100에서 110범위로 결정할 수 있다.

이 범위에서의 측정효율 차이는 9% 이다. 다른 표준물질과의 비교에서도 비슷한 경향을 보이므로 위의 결과를 최적화된 PSA 준위로 설정하는데 문제가 없는 것으로 확인했다.

그림 3은 각 계측시간에 대한 최소검출방사능을 보여준다. 표준물질과 동일한 조건인 PSA 110에서 시료용액 10 mL 에 대해 1분에서 240분 까지 4회 씩 측정했을 때의 평균값을 표시한 것으로 측정시간 20분이 지났을 때 일정한 최소검출방사능을 가지는 것을 볼 수 있다. 따라서, 액체섬광계수기 Quantulus 1220의 감도레벨은 약 20분의 계측시간이 적당하며, 0.61 Bq · L⁻¹ 이하의 농도는 미검출값으로 처리하였다.

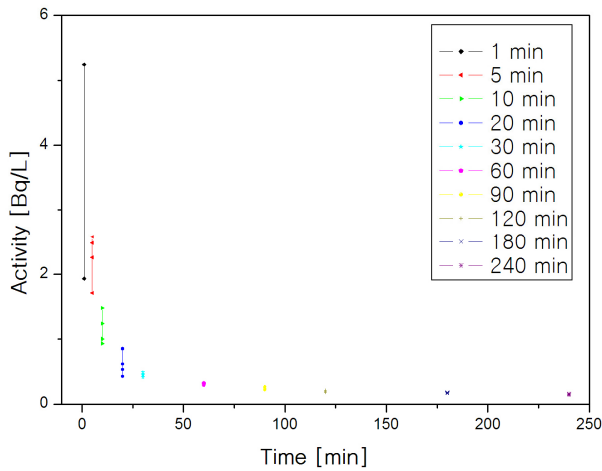


Figure 3. Minimum detectable activity vs. measurement time.

3.2 기반암의 종류에 따른 지하수 내 라돈 농도 변화

금정구 일대의 기반암의 종류를 고려하여 선택한 대표적인 10개 지점의 지하수 내 라돈농도 변화를 표1에 나타내었다. 라돈농도는 지하수가 흐르는 기반암에 포함된 라돈의 모원소인 라듐 함량에 영향을 받는다. 표 1에는 기반암에 포함된 라돈의 모원소들인 라듐-226과 우라늄(Total uranium)의 농도를 같이 나타내었다. 지하수 내 라돈 농도는 화강암류 지역이 화산암류인 안산암지역에서 보다 높게 나타나는데, 이는 기반암의 라듐 함량을 잘 반영한다. 이러한 결과는 기존의 연구 결과에서도 잘 나타난다. 토양 내 라돈 농도와 모원소들인 라듐 및 우라늄 함량이 화강암류 지역이 화산암류인 안산암지역에서 보다 높게 나타난 결과들이 보고되고 있다[19,20,21,22]. 백악기 화산암류와 화강암을 비교하면 우라늄 평균 함량이 각각 3.21±1.43 ppm과 4.18±2.31 ppm으로 화강암에서 약간 높게 나타났다. 그러나 화강암류 지역에서 지하수 내 라돈의 암석 종류별 전체 평균 농도를 비교해보면, 전반적으로 흑운모화강암(Biotite granite: 191.39 Bq · L⁻¹), 미문상화강암(Micro graphic granite: 141.88 Bq · L⁻¹), 아다멜라이트(Adamellite: 92.94 Bq · L⁻¹), 안산암(Andesite: 35.35 Bq · L⁻¹) 순으로 높게 나타났다. 그러나, 모원소인 라듐-226을 보면 아다멜라이트, 미문상화강암, 흑운모화강암 순으로 높게 나타남으로, 기반암의 라듐 농도를 잘 반영하지 못하고 있다. 이는 지하수 내 라돈 농도가 기반암의 모원소의 함량 이외 다른 요인들에 의해 영향을 받고 있음을 잘 시사하고 있다.

Table 1. Radon concentrations in groundwater, ²²⁶Ra and U contents in adjacent rocks in study area.

Rock type	Location	Well depth	2010 Aug	Oct	Nov	Dec	2011 Jan	Feb	Apr	May	Jun	Jul	Aug	²²⁶ Ra	U
Andesite (An)	두영리	200*	50.1 [†] ±1.4	45.3 ±2.5	53.1± ±0.1	42.8 ±0.9	42.8 ±6.2	17.6 ±2.0	39.2 ±8.1	36.6 ±2.0	34.8 ±0.4	11.2 ±0.9	15.0 ±1.6	22.8±9.3 [‡]	1.8±0.9 [§]
	임석	150	234.8 ±0.3	204.5 ±9.2	181.1± ±7.0	149.4 ±22.3	153.8 ±14.3	166.2 ±34.3	206.2 ±7.0	186.0 ±1.6	67.9 ±0.8	73.6 ±6.6	75.9 ±1.3		
Micro graphic granite (Mg)	신천마을	150	138.4± ±4.6	219.7 ±5.9	120.7± ±6.4	116.8 ±4.3	106.2 ±6.5	103.5 ±2.3	156.2 ±6.6	95.9 ±1.6	81.6 ±5.8	36.1 ±3.3	23.0 ±2.1	45.6±3.7	3.4±0.1
	오름대 분동	150	222.6 ±5.1	182.9 ±11.5	191.3± ±7.4	170.1 ±7.8	176.4 ±5.1	95.2 ±0.5	186.4 ±16.4	161.6 ±10.5	96.0 ±3.7	171.7 ±2.1	130.3 ±0.4		
	동래 양로원	150	136.4 ±0.3	-	144.0± -	90.6 ±4.7	113.5 ±0.6	136.9 ±3.0	101.3 ±3.7	-	84.0 ±1.7	92.6 ±3.1	98.9 ±1.4		
Adamellite (Ad)	달마사	150	129.8 ±5.2	171.1 ±4.2	207.6 ±15.0	-	91.2 ±7.0	99.9 ±2.7	93.0 ±2.8	86.6 ±5.5	90.6 ±1.7	82.3 ±3.3	56.3 ±2.0	46.0±0.8	4.0±0.1
	부산 대학교	200	62.0 ±2.0	66.8 ±3.7	54.5 ±1.8	58.1 ±4.9	49.8 ±9.3	63.3 ±1.3	57.4 ±5.8	49.6 ±2.7	50.4 ±1.1	58.8 ±2.5	83.7 ±1.6		
Biotite granite (Bg)	상현마을	200	80.7 ±2.8	96.1 ±9.9	115.1 ±1.0	183.2 ±7.8	151.6 ±2.8	158.4 ±3.8	160.9 ±3.5	122.1 ±2.8	88.3 ±6.4	142.6 ±3.2	186.9 ±1.0		
	현대	120	238.1 ±0.8	227.2 ±6.3	225.0 ±16.2	221.5 ±14.8	228.2 ±15.8	178.6 ±5.5	169.8 ±3.9	216.9 ±8.1	182.7 ±4.9	61.3 ±2.6	192.3 ±5.7	34.6±0.8	2.9±0.4
	국제그린	120	280 ±25.6	246.9± ±68.4	285.1 ±1.8					228.3 ±3.0	203.9 ±8.1	233.1 ±9.4	260.1 ±2.7	217.8 ±11.0	

* : unit [m] † : unit [Bq · L⁻¹]
‡ : unit [Bq · m⁻³] § : unit [mg · kg⁻¹]

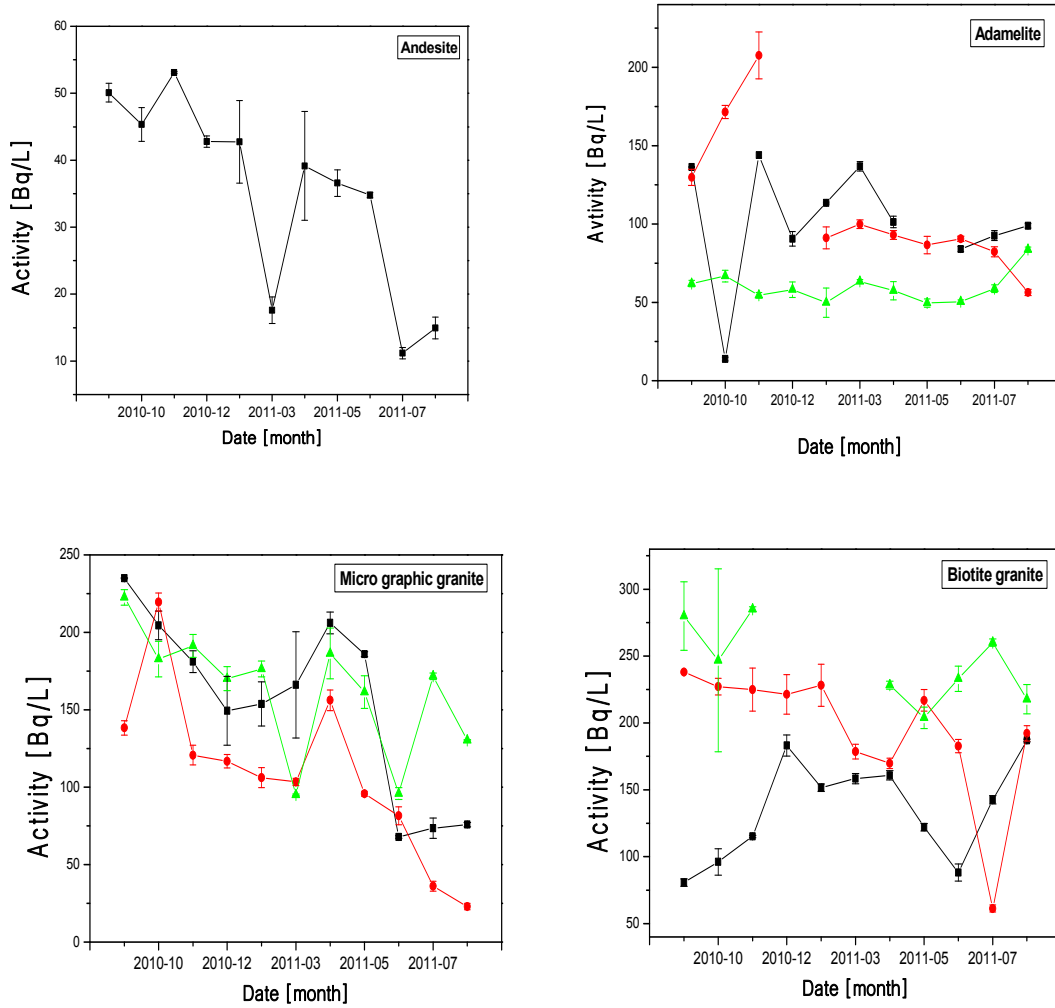


Figure 4. Long-term variation of radon concentration in groundwater according to aquifer rock type.

조사지역의 동일한 화강암 지역의 지하수에서 라돈 농도에서 많은 차이를 나타내고 있다. 4가지 종류의 화강암 지역의 지하수 내 라돈농도 변화를 보면, 흑운모화강암의 라돈농도 변화는 약 25%에서 45%사이의 변화를 보이고, 미문상화강암에서는 크게 60%까지의 차이를 나타낸다. 아다멜라이트에서는 약 40%까지의 변화를 보이고, 안산암에서는 약 20%의 라돈농도 변화가 나타난다. 이러한 결과는 모원소인 라듐의 함량이 같은 동일한 기반암에 포함된 지하수 내 라돈농도도 큰 폭으로 변화됨을 지시한다. 생각해 볼 수 있는 하나의 요인은 기반암의 절리 밀도의 지하수 내 라돈의 농도에 의 영향이다. 절리란 암석에 발달된 균열을 지칭한다. 즉 절리 밀도가 높은 암석은 라돈의 발산력이 높기 때문에 암석으로부터 더 많은 라돈이 지하수로 유입될 수 있으며, 높은 비표면적(specific area)은 암석으로부터 모원소인 라듐이 더욱 많이 용해되어 지하수 내 라돈 농도가 증가된다. 본 연구에서도 동일한 암석을 기반암으로 하는 지역에서도 단층대

에 가까워 절리 밀도가 높은 지역의 지하수에서 라돈 농도가 높게 나타나는 경향이 나타나어 암석의 절리 발달이 지하수 내 라돈농도에 주요한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

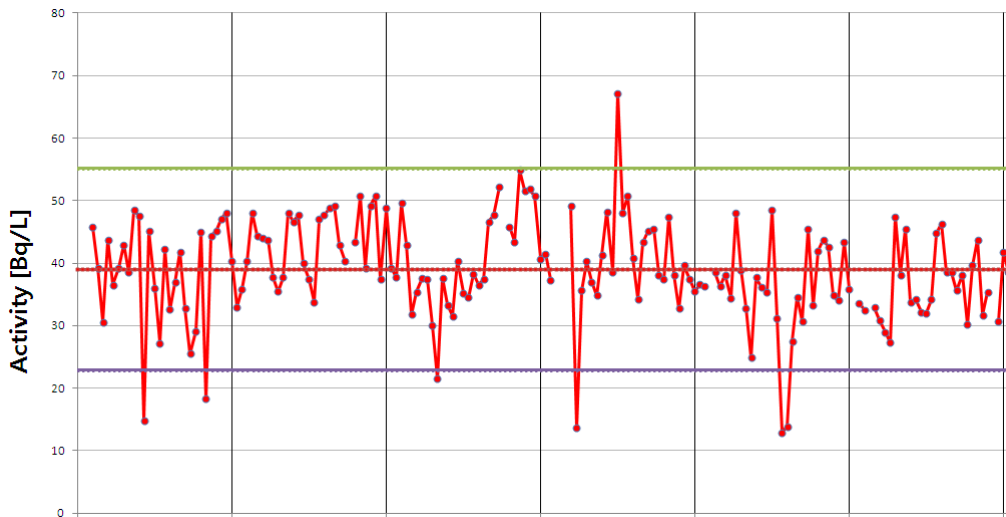
그림 4는 암석별로 지하수 내 라돈농도의 월별 변화를 나타낸 것이다. 10개 지점에서 같은 시료를 이용하여 2개의 바이알을 만들었으며, 각각 5분씩 4회 측정된 값의 평균을 나타낸 것이고, 그래프의 불확도는 각 바이알의 평균 측정값에 대한 표준편차를 나타낸다. 기체의 용해도는 온도에 반비례한다는 사실을 고려할 때 지하수 내 라돈 농도는 여름이 낮고 겨울이 높은 양상을 나타내어야 하나, 연구지역의 10개 지점에서 1년간 정기적으로 측정된 라돈농도의 계절적 변화 양상을 살펴보면, 뚜렷하게 구분되는 특징적 변화양상이 나타나지 않고 있다. 이러한 변화의 원인에 대하여서는 더욱 자세한 연구가 있어야 할 것이다.

3.3. 장기측정을 통한 라돈의 농도변화 요인 분석

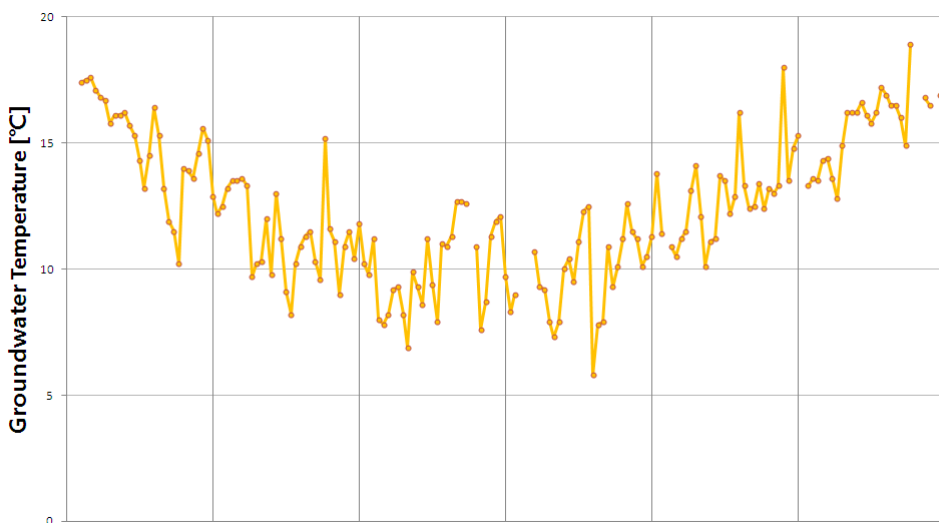
라돈농도에 영향을 주는 환경요인과의 상관관계를 알아보기 위해 위에서 선택한 10지점 중 심도 200 m 아다멜라이트를 기반암으로 하는 한 지점을 선택하여 2011년 11월부터 2012년 4월까지 6개월 간 수온, 기온, 대기압, 강수량을 측정하여 라돈농도와 비교하였다. 그림 5를 보면, 6개월 간 지하수 내 라돈 농도는 평균 39.0 Bq · L⁻¹의 비방사능 값을 보인다.

지하수의 수온은 대기온도가 영하로 떨어지는 1월과 2월 중에 일부 10°C 이하로 낮아져 대기온도 변화와 유사

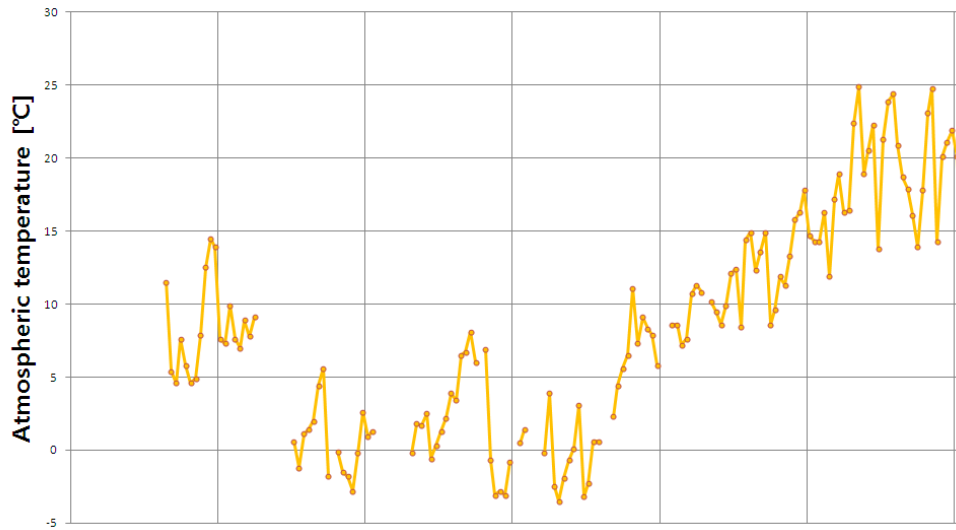
한 변화 경향을 보이거나, 전반적으로 대기온도에 비해 변화 폭이 아주 작게 나타난다. 이론적으로 기체의 용해는 온도에 반비례하므로, 지하수 내 라돈 농도는 수온이 낮을 때는 높게 나타나는 변화 경향을 보여야 한다. 그러나 수온이 낮은 겨울철 1~2월 라돈 농도가 상대적으로 높은 경향을 나타내어야 하나 측정치에서는 이러한 경향이 뚜렷이 나타나지 않고 있으며(그림 5), 지하수 내 라돈 농도와 수온 및 대기온도와의 상관성 분석의 결과(그림 6)도 거의 상관성을 나타내지 못하였다.



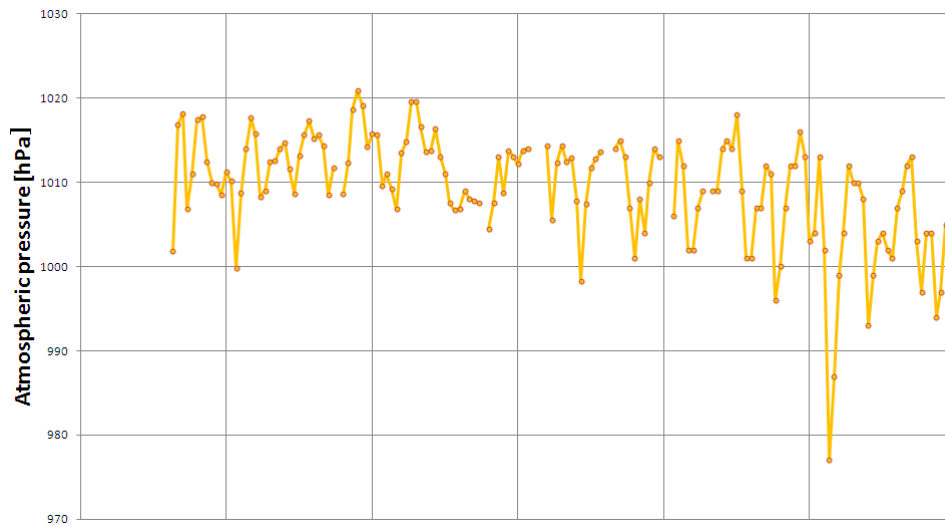
(a) Radon concentration in groundwater



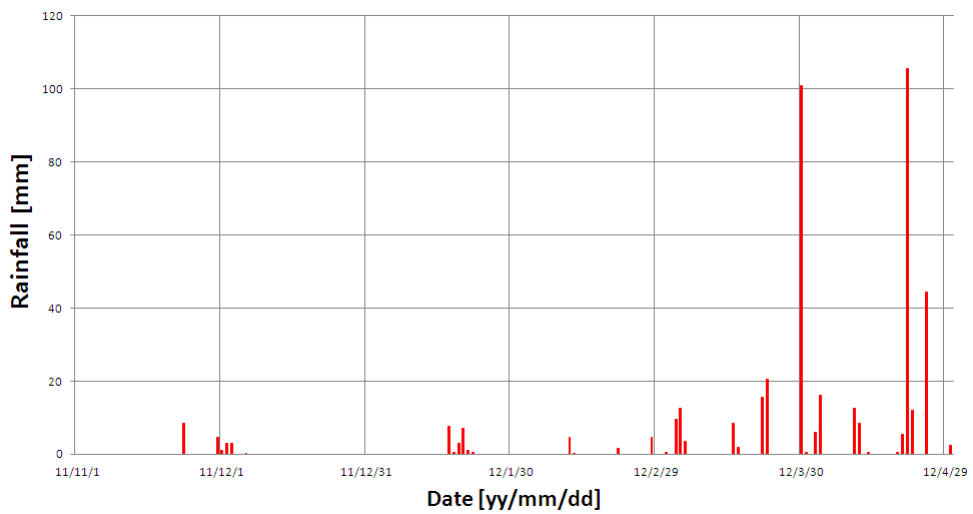
(b) Groundwater temperature



(c) Atmospheric temperature

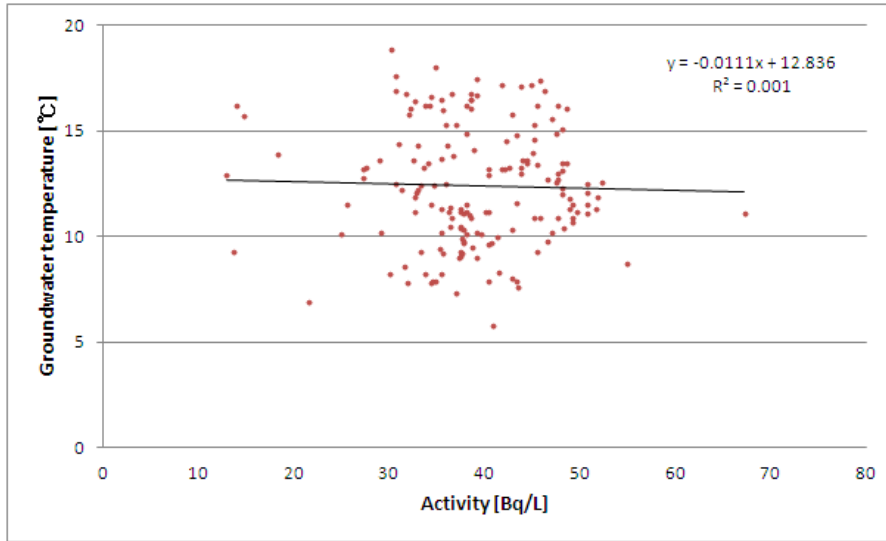


(d) Atmospheric pressure

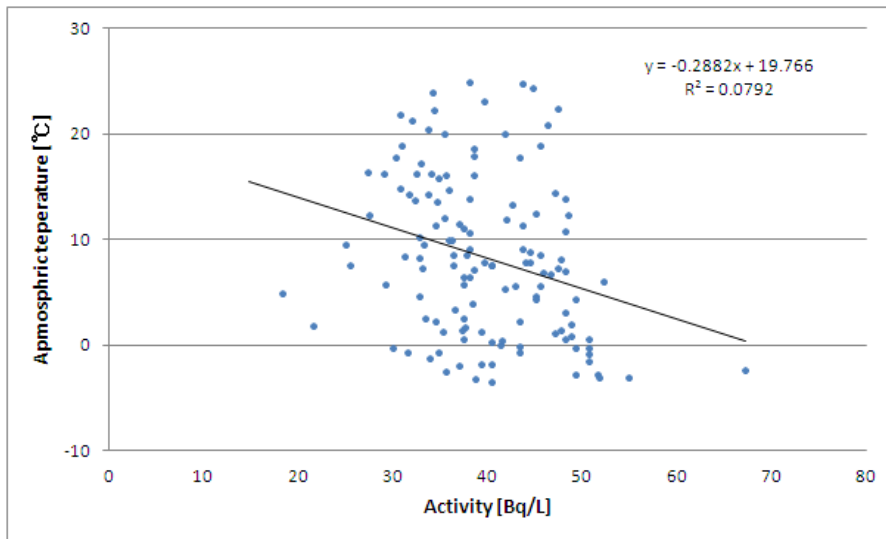


(e) Rainfall

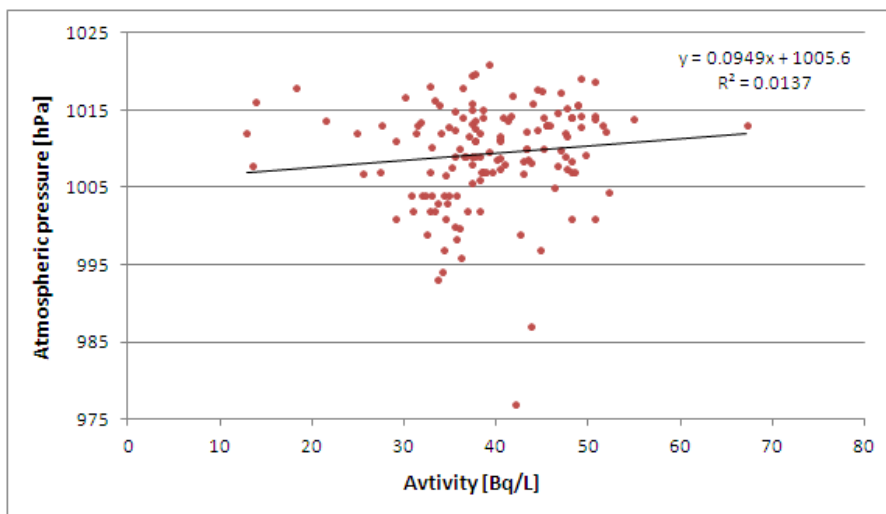
Figure 5. The variation of radon concentration in groundwater and environmental factors.



(a) Radon concentration vs. Groundwater temperature



(b) Radon concentration vs. Atmospheric temperature



(c) Radon concentration vs. Atmospheric pressure

Figure 6. Correlation analysis for radon concentration in groundwater and environmental factors.

토양 내 라돈농도는 대기압에 영향을 받는 것으로 잘 알려져 있다. 토양 내 라돈의 단기적 변화를 분석한 결과에 의하면, 라돈 농도는 대기 압력의 변화에 대해 현저한 부의 상관관계를 가지며 전 계절에 걸쳐 단기변화에 가장 주요한 영향을 미친다. 대기압이 높을 경우에는 대기의 공기가 토양 내 유입됨에 따라 토양 내 라돈농도가 희석되어 감소하게 되며, 반대로 대기압이 낮아질 경우에는, 심부토양의 높은 농도의 라돈가스가 상부로 끌어 올려지는 효과로 라돈농도가 높아진다[21]. 그러나 대기압과 지하수 내 라돈 농도에의 영향을 분석해보면, 그림 5와 그림 6에서와 같이, 대기압이 지하수 내 라돈 농도에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 이번 연구에서 분석된 지하 200 m에 존재하는 암반 지하수에는 이러한 대기압의 영향이 미치지 않는다고 할 수 있다.

강수의 영향을 분석해보면, 연구기간 동안 강수량이 많은 경우 1일에서 3사이에 일시적으로 지하수 내 라돈 농도가 감소하는 경향이 나타나기도 하는데, 이지역의 지하수는 강수의 지하수로 함양이 빠르게 진행되어 라돈 농도에 영향을 준다고 할 수 있다.

그림 6은 지하수 내 라돈 농도와 수온 및 대기온도, 대기압과의 상관관계를 나타낸 것이다. 분석의 결과도 라돈 농도와 수온에서는 $R^2=0.001$, 기온과의 관계에서는 $R^2=0.0792$ 로 거의 상관성을 나타내지 못하고 있으며, 대기압과의 관계에서도 $R^2=0.0137$ 의 값을 나타냈다, 두 불연속변수 사이의 상관관계를 카이스퀘어 검정법으로 표현해 보았을 때도 역시 라돈 농도는 하나의 변수에 대해서가 아니라 여러 가지 혼합적 요인에 의해 변화한다고 볼 수 있다.

이상의 지하수 내 라돈농도의 지난 6개월간 변화에 대한 기상요인에 대한 영향을 분석 결과를 종합하면, 지하 깊은 곳에 존재하는 암반 지하수에서는 수온, 대기온도와 대기압과 같은 이 큰 영향을 미치지 못하며, 강수가 일시적으로 라돈농도에 약간의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 연구 결과는 지하수 내 라돈농도의 변화에는 보다 복합적인 환경적 및 지질학적 요인(지하수 순환작용 및 지진현상 등)에 의한 영향을 시사하므로 이에 대한 더욱 자세한 분석이 필요한 것으로 나타났다.

4. 결론

지하수내 라돈농도의 측정에 사용된 저준위 액체섬광계수기(Wallac社 Quantulus 1220)의 최적화 방법을 위해 라듐-226의 표준선원을 이용하여 조제한 12개의 표준물질로 백그라운드의 계수율, 효율, 알파입자의 CPM과 FM 값을 측정된 결과 PSA준위 100에서 110범위에서 최적조건이 나타났다. 최소검출방사능은 표준물질을 이용하여 최적의 조건으로 결정된 PSA준위 110에서 측정기기의 최소방사능을 결정하였는데, 계측시간을 20분으로 측정했을 때 $0.61 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 나타났다.

1년 동안의 장기적 변화에서 화강암지역의 지하수에서는 라돈농도가 높게 나타나고, 화산암인 안산암 지역의 지하수에서는 낮은 농도 분포를 나타낸다. 또한, 동일한

암석을 기반암으로 하는 지역에서도 단층대에 가까워 절리 밀도가 높은 지역의 지하수에서 라돈 농도가 높게 나타나는 경향이 나타나어 암석의 절리 발달이 지하수 내 라돈농도에 주요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 연구 지역의 10개 지점에서 1년간 정기적으로 측정된 라돈농도의 계절적 변화 양상을 살펴보면, 뚜렷하게 구분되는 특징적 변화양상이 나타나지 않고 있다.

6개월간 지하수 내 라돈 변화에 대한 기상요인에 대한 영향을 분석 결과, 지하 깊은 곳에 존재하는 암반 지하수에서는 강수가 일시적으로 라돈농도에 약간의 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 수온, 대기온도와 대기압과 같은 기상요인은 큰 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다. 지하수 내 라돈농도의 변화에는 보다 복합적인 환경적 및 지질학적 요인에 영향을 받을 수 있으므로, 이에 대한 더욱 자세한 분석이 필요하다. 따라서 향후 지속적으로 지하수 내 라돈 농도의 장·단기변화와 변화요인 분석을 실시하고 데이터베이스를 구축하여, 지하수 내 라돈변화와 지진과의 상관성도 파악할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 일반연구지원사업의 기본연구(2010-0013643)이며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Committee on Risk Assessment of Exposure to Radon in Drinking Water, National Research Council. Risk assessment of radon in drinking water. National Academy Press, 1999;5-8.
2. USEPA. National primary drinking water regulations; Radionuclides (Final rule). 40CFR Parts 9. 2000.
3. 이효민, 김진섭, 안정근, 손은진, 문기훈. 부산지역 암석, 토양, 지하수 및 지하공간에 대한 라돈의 분포 특성 연구. 대한지질학회 추계학술발표회 초록집. 2006;146.
4. Przylibski TA, Mamont-Ciesla K, Kusyk M, Dorda J, Kozłowska B. Radon concentrations in groundwaters of the Polish part of the Sudety Mountains (SW Poland). J. Environ. Radioact. 2004;75:193-209.
5. Mullinger NJ, Binley AM, Pates JM, Crook NP. Radon in Chalk streams: Spatial and temporal variation of groundwater sources in the Pang and Lambourn catchments, UK. J. Hydrol. 2007;339: 172-182.
6. Skeppström K, Olofsson B. A prediction method for radon in groundwater using GIS and multivariate statistics. Sci. Total Environ. 2006;367:666-680.
7. Teng TL. Some recent studies on groundwater radon content as an earthquake precursor. J. Geophys. Res. 1980;85:3089-3099.

8. Igarashi G, Saeki S, Takahata N, Sumikawa K, Tasaka S, Sasaki Y, Takahashi M, Sano Y. Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan. *Science*. 1995;269:60-61.
9. Ramola RC, Choubey VM, Negi MS, Prasad Y, Prasad G. Radon occurrence in soil-gas and groundwater around an active landslide, *Radiat. Meas.* 2008;43:98-101.
10. Ghosh D, Deb A, Sengupta R. Anomalous radon emission as precursor of earthquake. *J. Appl. Geophys.* 2009;69:67-81.
11. Knoll GF. Radiation detection and measurement, 2nd edition, Wiley. 1989:328-370.
12. Horrocks DL. Application of liquid scintillation counting. New York and London Academic Press. 1974:19-32.
13. Noakes JE, Schonhofer F, Polach HA. Liquid scintillation spectrometry. *Radiocarbon*. 1992;43:397-403.
14. 신현상, 이창우, 이명호. 저준위 액체섬광계수기와 파형분석법을 이용한 수용액 중 라돈-222 및 라듐-226의 분석법 연구. 원자력연구소. 1998.
15. Curie LA. Limits for qualitative detection and quantitative determination. *Anal. Chem.* 1968;40:586.
16. Salonen L. Measurement of low levels of ²²²Rn in water with different commercial liquid scintillation counters and pulse-shape analysis. *Radiocarbon*. 1994;361
17. Badhan K, Mehra R, Sonkawade RG. Measurement of radon concentration in ground water using RAD7 and assessment of average annual dose in the environs of NITJ, Punjab, India. *Ind. J. Pure Appl. Phys.* 2010;48:508-511.
18. Subber ARH, Ali MA, Al-Asadi TM. The determination of radon exhalation rate from water using active and passive techniques. *Adv. Appl. Sci. Res.* 2011;2(6): 336-346.
19. Cho JS, Ahn JK, Kim HC, Lee DW. Radon concentrations in groundwater in Busan measured with a liquid scintillation counter method. *J. Environ. Radioactiv.* 2004;75:105-112.
20. 이효민, 문기훈, 김진섭, 안정근, 김현철. 부산시 금정구 일대 암석 및 토양에서 일부 환경방사성 핵종들의 분포 특성. *암석학회지*. 2008;17:179-190.
21. 이효민, 김진섭, 김선웅, 문기훈, 안정근. 체계적 모니터링 시스템에 의한 토양 내 라돈의 시·공간적 변화 특성 및 요인 분석. 2010년 춘계 지질과학기술 공동학술대회 논문집. 2010:193.
22. 홍영국, 홍세선. 2002, 국내 기반암의 자연 방사성 원소 함량과 라돈의 유효성(요약문). *한국지구과학회 춘계학술발표 논문요약집*. 2002:64.

A Study on the Variation of Rn-222 Concentration in Groundwater at Busan-Geumjeong area

Jungsook Cho*, Hyomin Lee†, Sunwoong Kim†, and Jin-seop Kim†

* Department of physics, Pusan National University, Busan

† Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan

Abstract - In this paper, we measured the variations of radon concentrations in groundwater using low-level Liquid Scintillation Counter (LSC), an instrument for analyzing the alpha and beta radionuclides at its 10 sites around the Kumjung-Gu, north-western of Busan. Optimization of Pulse Shape Analyzer (PSA) to determinate the highest value of figure of merit (FM) was decided using Quantulus 1200 LSC with radium-226 source, the optimal PSA level was shown in the range of 100 to 110.

The results show that the Minimum Detectable Activity (MDA) of radon concentrations is 0.61 Bq · L⁻¹ for 20 minutes in PSA level. We find that the average radon concentration in groundwater is high in granitic rock area and low in volcanic rock area. (Biotite granite : 191.39 Bq · L⁻¹, Micro graphic granite : 141.88 Bq · L⁻¹, Adamellite : 92.94 Bq · L⁻¹, Andesite (volcanic) : 35.35 Bq · L⁻¹). No significant seasonal variation pattern is observed from the long-term variation analysis from 10 selected sites. We have not seen the significant correlation of radon concentration to groundwater temperature, atmospheric temperature, atmospheric pressure and rainfall. The concentration variation is probably caused by more complex factors and processes.

Keywords : Radon-222, Groundwater, LSC, RAD7, Environmental effects, Busan