



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2015年 2月

碩士學位 論文

식수 내의 라돈농도 측정에 관한 연구

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

金 怔 何

식수 내의 라돈농도 측정에 관한 연구

A Study on the Measurement of Radon Concentration for
Drinking Water

2015年 2月 25日

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

金 怔 何

식수 내의 라돈농도 측정에 관한 연구

指導教授 鄭 運 官

이 論文을 原子力工學 碩士學位申請 論文으로 提出함

2014年 10月

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

原 子 力 工 學 科

金 杼 何

金 枉 何 의 碩 士 學 位 論 文 을 認 准 함

委員長 朝鮮大學校 副教授 李 庚 鎭 (印)

委 員 朝鮮大學校 教 授 宋 鍾 淳 (印)

委 員 朝鮮大學校 教 授 鄭 運 官 (印)

2014 年 11 月

朝鮮大學校 大學院

목 차

표 목차	III
그림 목차	IV
ABSTRACT	V
제1장 서 론	1
제1절 연구 배경 및 목적	1
제2절 연구의 필요성	3
제2장 본 론	4
제1절 라돈	4
1. 라돈의 특성	4
2. 라돈의 위해성	7
제2절 라돈 농도 측정	9
1. 라돈모니터링 장비를 이용한 라돈 방출량 측정	9
2. 검출 원리 및 방법	11
제3절 실험 측정 결과	18
1. 먹는 샘물 시료의 측정 결과	18
2. 지하수 시료의 측정 결과	19
3. 지질과의 상관관계 조사	22
제4절 국민 피폭선량 계산	28
1. 음용수를 통한 라돈섭취	28
2. 분석결과	30

제3장 결론 및 고찰 33

표 목 차

표 2.1.1	식수에서 방사성 핵종의 권장 또는 가이드 라인 값 (ME, 2008)	7
표 2.1.2	라돈에 의한 폐암 사망 위험도	8
표 2.3.1	먹는 샘물 시료의 측정 결과	18
표 2.3.2	광주광역시 지하수내 라돈농도	20
표 2.3.3	광주광역시 서구 화정동 A 지하수내 라돈농도	21
표 2.3.4	비교지역의 지하수내 라돈농도	21
표 2.3.5	광주광역시 암상	23
표 2.3.6	비교지역 암상	27
표 2.4.1	장내 물 체류 평균 시간(ICRP)	28

그림 목 차

그림 2.1.1	우라늄과 토륨 붕괴 도식	5
그림 2.2.1	SARAD사 RTM1688-2	10
그림 2.2.2	RTM1688 측정시스템 개략도	10
그림 2.2.3	Radon chamber operation	11
그림 2.2.4	RTM1688 Block diagram	12
그림 2.2.5	Radon chamber step response	13
그림 2.2.6	Alpha Spectrum (시멘트계 텍스 측정)	14
그림 2.2.7	RTM1688을 이용한 시료 내 bubbling 과정	15
그림 2.2.8	Radon Vision 프로그램	16
그림 2.2.9	보정계산 프로그램	17
그림 2.3.1	광주광역시 지질주상도	23
그림 2.3.2	광주광역시 동구 지질주상도	24
그림 2.3.3	광주광역시 서구 지질주상도	24
그림 2.3.4	광주광역시 남구 지질주상도	25
그림 2.3.5	광주광역시 북구 지질주상도	25
그림 2.3.6	광주광역시 광산구 지질주상도	26
그림 2.3.7	영암군과 해남군의 지질주상도	27
그림 2.4.1	시간에 따른 먹는 샘물(C-2 사) 내의 라돈 농도	30
그림 2.4.2	시간에 따른 광주광역시(화정동 A) 지하수 내의 라돈농도	31
그림 2.4.3	시간에 따른 비교지역(영암군 남산리2) 지하수 내의 라돈농도	31

ABSTRACT

A Study on the Measurement of Radon Concentration for Drinking Water

Kim Jung Ha

Advisor : Prof. Chung Woon-kwan, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

Recently through existing national research, some areas exceed the value of proposed standards in the United States for radon(Rn-222) in groundwater and it becomes a problem. So the interest of radon in drinking water is increasing day by day. Accordingly, radon concentration in a groundwater including the natural mineral water was measured in this study. In the case of natural mineral water, representative drinking water to be distributed evenly throughout the country were selected and In the case of groundwater, groundwater of Gwang-ju and some areas of comparison were collected. So radon emissions through RTM1688-2(SARAD) were measured. In the case of natural mineral water, it shows that 41.32pCi / L ~ 740.24pCi / L were very low value compared to 4000pCi/L, so it seems to be no problem for drinking. In the case of groundwater, 35.35pCi / L ~ 3290.69pCi / L seems a significant difference. The size of the system or aquifer wells became large number of variables that affect the radon concentration. Groundwater in areas of comparison is 102.41pCi/L~3333.97pCi/L and 3333.97pCi/L is the closest in in drinking baseline in 4000pCi / L . But this is also not a problem for drinking. Compared to a high concentration of the lipid water sources, containing radon can be seen that the situation will appear higher in the region of granite. Assuming that the worst case that we drink groundwater containing the highest concentration of radon, form of radon is like a saw blade

distribution. Form of this condition repeat at the time of intake and is like a saw blade distribution. The results of this study are available to assess the risk of radon and to use the basis of provision for management standards and will be aim to expand awareness of the risk of radon safety about public health.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경 및 목적

최근 국내에서도 연구를 통하여 2008년 2월 환경부 발표에 의하면 춘천지역을 비롯한 다수 지역의 지하수(마을상수도와 간이급수시설)에서 미국의 먹는물 기준치(혹은 권고치)를 상회하는 우라늄(uranium)과 라돈(radon)이 검출되어 관련 지자체와 주민들의 우려를 낳고 있다. 특히 춘천지역의 경우 지난해 예비조사 발표 이후 지속적으로 고농도의 라돈이 발견되었으며 춘천시 외곽 7개 지역 14개 지점지 중 10개 지점에서 미국의 기준치를 초과하였다(환경부, 2008). 그 중 춘천시 남산면 동막골 지하수의 경우 라돈이 64,688pCi/L 검출되어 기준치를 16배 이상 상회하였다. 환경부 조사에서 대전 지역의 경우 우라늄의 초과가 그리고 춘천의 경우 라돈의 초과가 현저히 나타났다. 환경부 발표 이후 춘천시는 해당 지하수시설에 대하여 사용 전에 폭기시설(aeration facility)을 갖추는 등 나름의 조치를 취하였다. 한편 지역 언론에서도 큰 관심을 보여 2008년 4월 4일에 KBS강원 시사파일에서는 “춘천 지하수가 위험하다”라는 방송을 통해 지하수내 방사성 물질 문제를 다루었다. 이 방송에서 라돈의 위험성에 대한 관련 시의 일반인 공지 부실과 신뢰성이 떨어지는 폭기시설 등을 꼬집었다. 중앙정부의 담당공무원은 전화인터뷰에서 추가적인 정밀조사를 통해 원인을 밝히고 적절한 대책을 강구토록 하겠다고 하였다.¹⁾

또한 국내 지하수 중 전북 남원시 이백면 내기마을 음용수에서도 기준치 이상의 라돈이 검출되어 문제가 된 적이 있다. 환경부 보도자료에 따르면 내기마을 음용수인 지하수 6곳을 조사한 결과 라돈이 2478.27pCi/L~7663.71pCi/L가 검출되어 라돈이 권고치에서 최고 1.92배 가량을 초과하는 높은 수준으로 검출되었다.²⁾

방사능이라는 단어에 민감한 반응을 내비치는 국내의 여론과 함께 환경 방사능의 대부분을 차지하는 라돈 농도가 예의 주시 되고 있고 최근 여러 국내 라돈 연구 결과의 발표와 언론의 관심은 대중의 관심을 유발시켜 전국적인 라돈조사와 저감화 시도가 이루어지고 있는 점은 긍정적이지만 라돈의 위해성을 과대평가하는 등의 자극적인 언론 보도는 국민의 막연한 공포심을 유발하여 오히려 라돈 조사 및 저감화에 많은 장애요소로도 작용하기 때문에 방사능에 대한 사람들의 불신을 감소시키고 국민건강의 안

전성과 이에 대한 인식의 확대를 목표로 한다.³⁾

또한 국내 지하수에 관한 라돈 연구가 있기는 하지만 상대적으로 토양가스와 실내공기에 더 많은 관심이 집중되어 있었기 때문에 음용수 내의 라돈농도 측정하고 기준 마련의 근거와 안전성 입증을 목표로 한다.

제 2 절 연구의 필요성

라돈은 장기적으로 노출될 경우 폐암에 걸릴 수 있다고 보고되고 있다. 미국 EPA에 의하면 미국인의 연간 폐암 사망자의 10% 이상인 약 20,000명 정도가 라돈자핵종의 누적폭로에 의한 것이며, 이는 대기오염에 의한 사망위험 보다 10배 이상 높으며 음주운전에 의한 사망자 숫자보다 더 높다고 한다.⁴⁾ 천연방사성핵종이지만 인간에게 피폭되는 연간 자연방사선량의 약 50%가 라돈 이외 자연방사선(35%), 의료 방사선(14%), 직업상 피폭(1%)이며, 인류가 피폭하는 방사선량 중 50% 이상을 차지한다는 의미에서 매우 중요한 방사선 피폭원이다. 특히 근래의 암역학 자료가 보여주듯이 위암발생률이 감소를 보이는 것에 반해 폐암 발생률이 증가함은 공기 중 라돈과 그 자핵종의 농도 문제를 다시 생각하게 만든다. 폐암 발생률 증가가 반드시 라돈에 의한 것이라고는 물론 없지만 라돈도 공기 중 여러 가지 발암인자의 하나이며 라돈에 의한 방사선 피폭이 흡연 등 다른 암 발생 요인과 상승작용을 할 수 있다고 가정한다면 라돈문제의 중요성이 강조된다.³⁾

또한 상당량의 라돈이 함유된 지하수를 식수로 음용할 경우에는 신장질환을 유발해 치명적인 영향을 끼칠 수 있다. 이에 따라 환경부는 선진국의 사례 및 우리나라의 라돈 배경농도 수준을 고려하여, 미국 환경청(Environmental Protection Agency : EPA)의 권고치로 4,000pCi/L를 준용하고 있다.²⁾

현재 국내에서는 생활용수의 대부분을 지표수에 의존하기 때문에 라돈이 다량 함유된 지하수 음용에 의한 인체노출은 거의 없다고 알려져 있다. 그러나 앞으로 지표수의 부족으로 인해 아파트 단지 등과 같은 대규모 주택단지를 조성할 시 부족용수의 대체로 지하수를 활용할 가능성이 높다. 또한, 최근에는 지하수를 음용수 또는 생활용수로 사용하는 주택의 비율이 늘어나면서 지하수 속에 존재하는 라돈이 실내에서 휘발되어 주요한 인체 노출경로가 되기도 하며²⁾ 지하수를 취수하여 샘물로 제조해 음용수로 많이 사용하고 있기 때문에 접할 수 있는 식수 내의 라돈의 안전성을 입증할 필요가 있다.

제 2 장 본 론

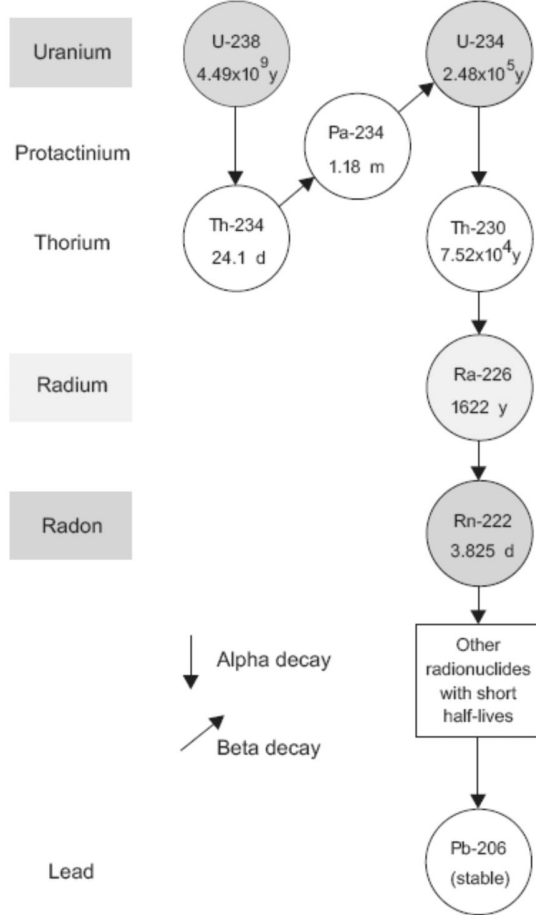
제 1 절 라돈

1. 라돈의 특성

대부분 자연적으로 노출되어 있는 자연방사선은 라돈 가스에 의한 것이다. 라돈(Rn-222)은 지각, 건축물, 암석, 토양 등에서 확산과 대류에 의해 대기 중으로 방출된다. 라돈의 종류에는 Rn-219(U-235 series), Rn-220(Th-232 series), Rn-222(U-238 series)로 세 가지가 있지만 일반적으로 Rn-222를 지칭한다. 라돈(Rn-222)은 같은 U-238 series를 이루고 있는 모핵종인 라듐(Ra-226)의 알파붕괴 시 생성되며 무색, 무취, 무미의 물리 화학적으로 안정한 비활성 기체이다. 라돈(Rn-222)은 약 3.824일의 반감기를 가지며 알파붕괴를 하는데 Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214의 딸핵종을 생성한다. 딸핵종들은 전자적 성질을 띄고 있어, 공기 중에 존재하는 먼지나 에어로졸 등에 흡착하게 되며, 흡착된 물질을 흡입하게 되면 폐에 침착되어 이때 방사성 물질인 알파선을 방출하게 되며 인체 피폭을 받게 된다.⁵⁾

또한, 라돈은 물에 녹기 쉬운 성질을 가지고 있기 때문에 지하수에 많이 용해되어 있어 토양을 통하여 대기 혹은 실내공기로 이동하기도 한다. 라돈 방출율은 암석의 라듐함량과 공극률, 밀도, 입자크기와 같은 물리적 성질과 주변온도, 수분함량과 같은 환경요인에 의해 지배받게 되는데 KINS(한국원자력안전기술원)에서 실시한 전국 라돈농도 조사 결과에 따르면 온도와 라돈의 관계는 음의 상관성을, 습도와 라돈의 관계는 양의 상관성을 갖는다고 보고되었다. 따라서, 본 연구에서도 측정된 식수 내의 라돈농도를 온도와 체적에 따라 보정을 해주었다.

(a) Uranium 238



(b) Thorium 232

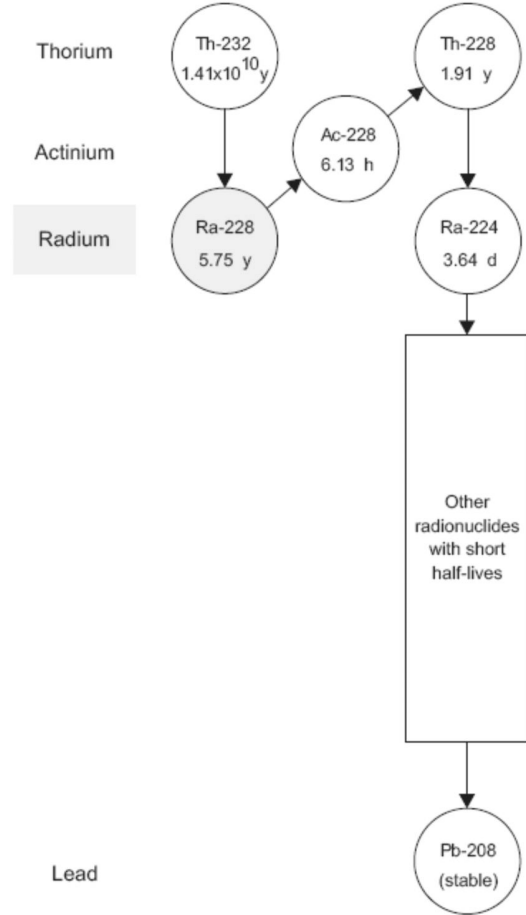


그림 2.1.1 U-238과 Th-232 붕괴 도식¹⁾

라돈은 우라늄의 붕괴과정에서 발생하는데 지하수에서 가장 빈번하게 발견되는 방사성 물질은 U-238 붕괴시리즈인 라돈, 라듐, 우라늄, 우라늄과 토륨232 붕괴시리즈인 라듐 등이다. 일반적으로 자연 상에서 존재하는 우라늄은 U-234, U-235 및 U-238의 방사성핵종 혼합물로 존재비율은 U-238 99.275%, U-235 0.72%, 그리고 U-234는 0.005%이며 방사능 비율(radioactivityratio)은 U-235/U-238 0.046과 U-235/U-234는 0.05이다. 그러므로 대부분 방사선은 U-238로부터 방출된다. 모핵종인 우라늄은 U-238 → Th-234 → U-234 → Th-230 → Ra-226 → Rn-222의 순서로 붕괴하며 최종적으로 납이 되면 안정해진다. 우라늄의 반감기는 35억년이며 붕괴 시 알파선과 베타선을 방출한다.¹⁾

라듐은 은백색 금속으로 우라늄과 토륨의 붕괴과정에서 생성되며, Ra-228, Ra-226,

Ra-224 등의 동위원소가 있다. 즉 우라늄 붕괴에서는 Ra-226가 생성되고 토륨의 붕괴 과정에서는 Ra-228과 Ra-224가 생성된다. Ra-228과 Ra-226의 반감기는 각각 5.75년과 1,622년이며 Ra-224의 반감기는 3.64일이다. 라듐은 붕괴 시 알파선, 베타선, 감마선을 방출한다. 앞서 밝힌 바와 같이 라돈은 자연 상(공기, 토양가스, 지하수 등)에 널리 분포하는 방사성 기체로 우라늄 계열의 알파붕괴 과정에서 라듐이 생성되고 다시 이것이 붕괴하여 라돈이 생성된다. 라돈의 동위원소로는 토론과 악티논이 있는데 반감기가 매우 짧아(각각 55.5초, 4초) 지각에서 생성된 토론과 악티논은 지표와 대기 중으로 방출되는 양은 라돈에 비해 극히 적으므로 통상 라돈을 말할 때는 Rn-222을 말한다. 라돈의 붕괴산물로는 반감기가 짧은 폴로늄(3.1분), 납(27분), 비스무스(20분) 등이 있다. 중간에 Pb-210(반감기 22년)를 거쳐 최종적으로 안정한 206Pb으로 변해가고 라돈의 반감기는 3.8일이다.¹⁾

2. 라돈의 위해성

라돈이 용해되어있는 지하수를 취수하여 음용수 및 생활용수로 사용하면 라돈이 실내로 휘발하여 호흡을 통해 인체에 흡입된 경우 체내에서 라돈이 자핵종인 폴로늄(Po-218, Po-214)의 알파붕괴에 의해 발생한 방사선인 알파선이 폐 조직을 손상시킨다. 알파선은 수MeV의 에너지를 가지며 폐 조직이 알파선에 지속적으로 노출하게 될 경우 기관지 세포에 악영향을 미치는 발암성물질로 알려져 있다. 미국환경청(EPA)에서는 라돈에 의한 연간 사망자수는 21,000명으로 폐암의 발병 원인 중 흡연에 이어 라돈을 2위로 꼽았다. 이에 따라 ICRP 103(2007)에서는 라돈권고치를 기존피폭상황과 계획피폭 상황에 나누어 설정하였다. 라돈과 자핵종에 대한 선량계수는 라돈과 외부 방사선 위험을 비교하는 역학연구로부터 도출된 명목 방사선위험 값인 라돈 ICRP 65(1993)의 선량환산합의를 대신하였다. 이에 따라 ICRP 115에서는 피폭감축 조치가 거의 확실히 합당한 것으로 보는 수준을 라돈으로 인한 연간선량 약 10mSv로 설정함에 계속 근거를 두었다. ¹⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹²⁾

라돈가스 자체의 위해성뿐만 아니라 라돈의 붕괴산물의 위해성도 매우 큰 것으로 알려져 있다. 라돈은 화학적으로 불활성이기 때문에 호흡으로 들어온 대부분의 라돈은 숨을 내쉬면 방출되나 붕괴산물의 경우 폐에 쉽게 침적된다.

또한, 라돈은 호흡 시 뿐만 아니라 음용 시에는 붕괴산물의 방사선 영향이 더 큰 것으로 알려져 있어 위가 주로 위해를 받을 가능성이 크다. 그러나 위암과의 상관성에 대한 확정적인 결론은 아직 없음으로 보인다. 이에 따라 라돈의 위해성과 관련하여 미국의 경우 4,000pCi/L을 제시하고 있다.¹⁾

표 2.1.1 식수에서 방사성 핵종의 권장 또는 가이드 라인 값 (ME, 2008)

Radionuclide	U.S.A.	Canada	Europe	Australia	WHO
Gross alpha (α)	15 pCi/L	2.7 pCi/L	-	13.5 pCi/L	13.5 pCi/L
²²⁶ Ra	5 pCi/L	16.2 pCi/L	-	13.5 pCi/L	27 pCi/L
²²⁸ Ra	(total)	13.5 pCi/L	-	13.5 pCi/L	2.7 pCi/L
Uranium	30 μ g/L	20 μ g/L	-	20 μ g/L	15 μ g/L
Radon	4,000 pCi/L	-	Sweden 2,700-27,000 pCi/L Finland 8,100 pCi/L Norway 13,500 pCi/L	2,700 pCi/L	2,700 pCi/L

우라늄, 라듐 및 라돈의 위해성과 관련하여 각국은 먹는물에서 이들의 기준치 혹은 권고치를 제시하여 규제하거나 혹은 주의를 환기시키고 있다. 세계보건기구(WHO), 호주, 미국, 캐나다는 먹는물 내 우라늄의 농도를 15~30 $\mu\text{g/L}$ 로 규제 혹은 권고하고 있으며, 라듐의 경우 미국은 총 라듐량으로 5 pCi/L, 세계보건기구, 호주 및 캐나다는 ^{226}Ra 과 ^{228}Ra 를 구분하여 각각 13.5~27 pCi/L 그리고 2.7~13.5 pCi/L로 권고하고 있다. 라돈의 경우 제한 혹은 권고치 범위가 매우 넓은데 세계보건기구와 호주는 2,700 pCi/L, 미국은 4,000 pCi/L이며 유럽(스웨덴, 핀란드, 노르웨이)의 경우 2,700~13,500 pCi/L이다. 북유럽국가(스웨덴, 노르웨이 등)들과 같이 지질적으로 화강암과 화성암이 풍부한 나라의 광산에서 작업한 광부들이 상대적으로 폐암에 많이 걸린다는 연구결과가 있다. 광산종사자의 cohort 연구 결과를 근거로 가정에서의 라돈 위해도를 평가한 미국 EPA 보고서의 폐암 사망위험도는 다음 표와 같다.³⁾

표 2.1.2 라돈에 의한 폐암 사망 위험도³⁾

라돈농도 ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)	폐암 사망위험도 (%)	
	비흡연자	흡연자
15	0.07	0.42
46	0.23	1.31
74	0.36	2.10
148	0.73	4.20
296	1.45	8.41
370	1.81	10.51
740	3.63	21.02

국제 암연구 기관에서는 이러한 위험 때문에 1988년에 라돈을 인체 발암물질로 분류하였으며, 전 세계 폐암의 3~14%가 라돈에 기인한다고 알려져 있다. 다른 사망요인이 없는 상태에서 라돈농도 0, 100, 400 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 에서 75세까지의 폐암에 대한 절대 위험도는 비흡연자의 경우 0.4%, 0.5% 및 0.7%로 각각 평가되었으며, 흡연자의 경우는 그 위험도가 25배 증가하여, 10%, 12% 및 16%로 각각 평가되었다. 특히 흡연자에게서 위해성이 높은 것으로 나타났다. 또한 라돈농도가 100 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ 씩 증가함에 따라 라돈의 위험도는 약 16%씩 증가하며, 유럽에서 폐암의 약 9%가 라돈에 의한 것이며, 이는 암에 의한 모든 사망률의 약 2%에 해당하는 것으로 평가되었다.³⁾ 위 내용에 근거해서 보면 지질의 영향을 받을 수 있다.

제 2 절 라돈 농도 측정

1. 라돈모니터링 장비를 이용한 라돈 방출량 측정

실내 공간에서 사용되는 라돈검출기는 전원 및 전력사용 여부에 따라 수동형검출기 (passive detector)와 능동형 검출기(active detector)로 구분된다. 수동형검출기는 비교적 사용이 간편하고, 검출기의 가격이 매우 경제적인 장점이 있으나, 장기간 측정으로 신속한 측정값을 얻기 어려우며, 외부환경(온습도, 마찰전하 등)에 의해 결과의 신뢰성이 저하되는 단점이 있다.⁶⁾ 능동형검출기는 라돈 및 자핵종의 농도를 순간적으로 측정하거나 연속적으로 측정할 때 사용되어 측정현장에서 신속한 측정값 및 연속적인 측정 자료를 얻을 수 있기 때문에 본 연구에서는 능동형검출기인 라돈 모니터링 장비(SARAD사 RTM-1688-2)를 사용하였다.

①라돈모니터링장비(SARAD사 RTM-1688-2)의 용도

- 건축물 실내 및 지하 생활공간 등의 라돈 가스 측정
- 건축 및 토목자재의 라돈 방출량 측정
- 작업장에서의 라돈가스 농도 측정
- 라돈 및 토론 가스량 모니터링
- DOSE 평가

②라돈모니터링장비(SARAD사 RTM-1688-2)의 특징

- 내장 펌프에 의한 연속 샘플링
- 시안성이 뛰어난 Background Light
- 장시간 동안 라돈가스 농도를 모니터링
- 라돈, 토론, 온/습도, 기압의 동시측정 가능



그림 2.2.1 SARAD사 RTM1688-2

본 연구에 사용한 RTM 1688-2는 라돈 및 토론을 동시에 측정 가능한 실리콘표면장벽 형식의 이동식 연속라돈모니터 장치이며 130ml 내부용적의 측정 Chamber 안으로 0.25 l/min 유속으로 공기를 흡입하여 측정한다.⁷⁾

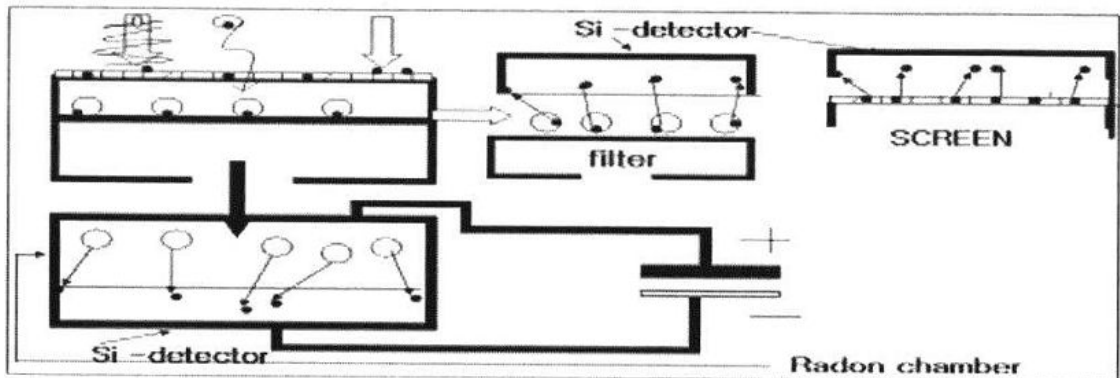


그림 2.2.2 RTM1688 측정시스템 개략도⁷⁾

2. 검출 원리 및 방법

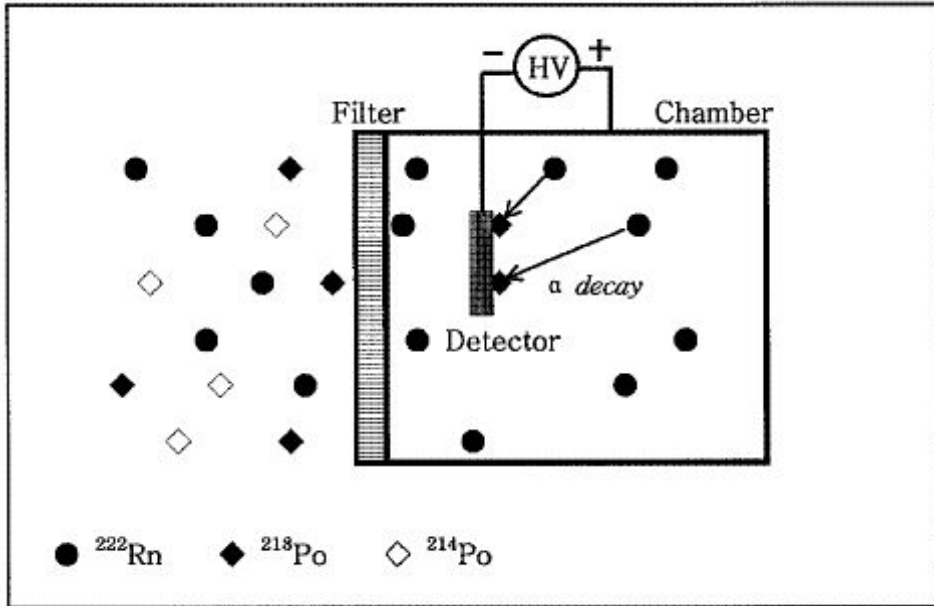


그림 2.2.3 Radon chamber operation⁷⁾

두 단계 필터시스템에 의해서 라돈과 토론의 딸핵종은 통과되지 않으며, Rn^{222} 와 Rn^{220} 만 통과하게 된다. 150mm^2 Active area 음극의 실리콘 표면장벽 검출기와 Chamber 벽면이 양극으로 이루어져 있으며, 약 1400V의 전위차로 되어 있다.⁷⁾

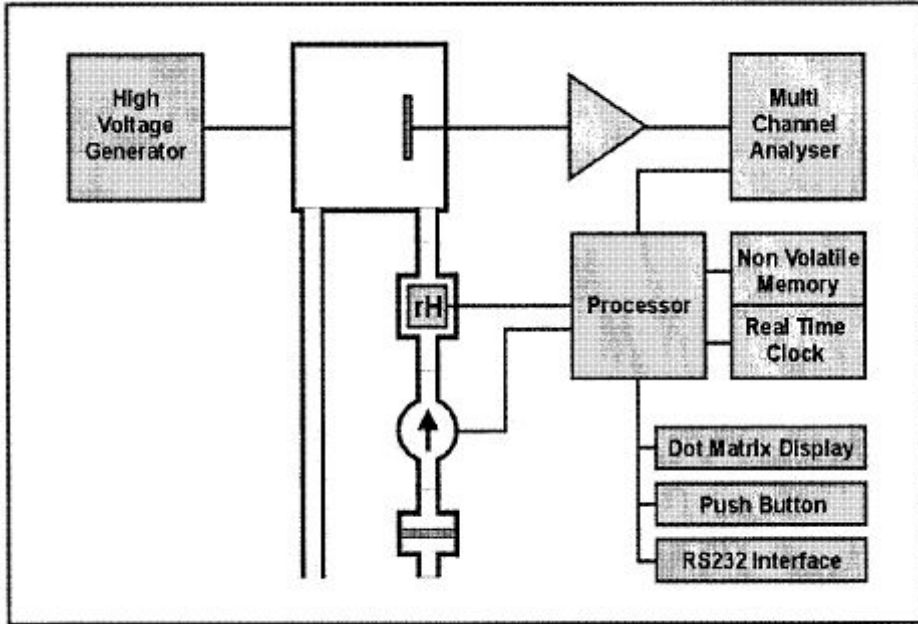


그림 2.2.4 RTM1688 Block diagram⁷⁾

이때 흡입된 공기 중에 존재하는 Rn^{222} 와 Rn^{220} 은 알파붕괴에 의해 이온성 물질인 Po^{218} 과 Po^{216} 이 증가하게 되며, 이들은 높은 전위차로 인해 검출기 표면에 포집되게 된다. 그러나 Po^{218} 검출효율은 통계적으로 약 50%정도 측정이 이루어진다. 따라서 Po^{218} 과 Po^{216} 의 계측수를 파악하여 흡입된 공기 안에 포함된 Rn^{222} 와 Rn^{220} 의 농도를 측정하게 된다. 두 가지 요소에 의해서 Count의 증가는 라돈측정농도에 Po^{214} 를 포함시킬 수 있다. 즉, 계측기에 포집된 Po^{218} 의 붕괴계열에서 Po^{214} 가 생성되면, Po^{218} 카운트에 의해 Po^{214} 카운트를 측정할 수 있다. 하지만 핵종 붕괴에 따른 딸핵종 생성시간이 오래 걸린다는 문제가 있다.⁷⁾

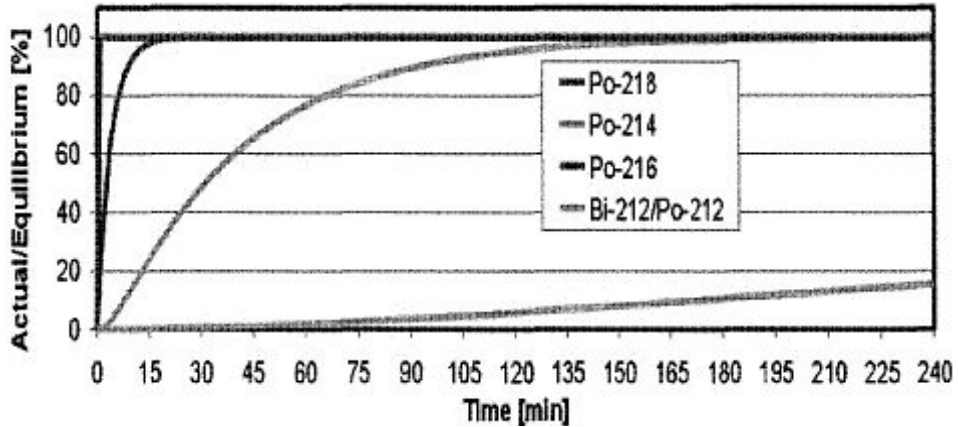


그림 2.2.5 Radon chamber step response

Total Measurement System Dose는 공기 중 라돈 농도의 검출하기 위한 고정효율을 다음의 식과 같이 나타낸다.

$$E = \frac{cts(counts)}{min \times kBq/m^3} \quad E(\text{efficiency}) : \text{절대습도에 따른 검출기의 측정 챔버안에서의 효율}$$

Rn²²²와 Rn²²⁰ 농도는 다음과 같은 식에 의해서 계산된다.

$$Rn^{222} \text{와 } Rn^{220} \text{의 농도}(C) = \frac{N}{E \times T}$$

T: Interval time

N: Registered P²¹⁶o or Po²¹⁸⁽²¹⁴⁾ count during the interval time

또 다른 붕괴산물로부터 생성된 핵종 Po²¹⁶과 Po²¹⁸⁽²¹⁴⁾의 각각의 계측 수는 5 Energy Windows(ROI)가 Spectroscopy System에 의해서 측정된다. 각각의 ROI에 의한 알파핵종은 다음과 같다.

ROI 1 : long-lived alpha emitters(e. g. Po²¹⁰)

ROI 2 : Po²¹⁸ or Bi²¹²

ROI 3 : Po²¹⁶

ROI 4 : Po²¹⁴

ROI 5 : Po²¹²

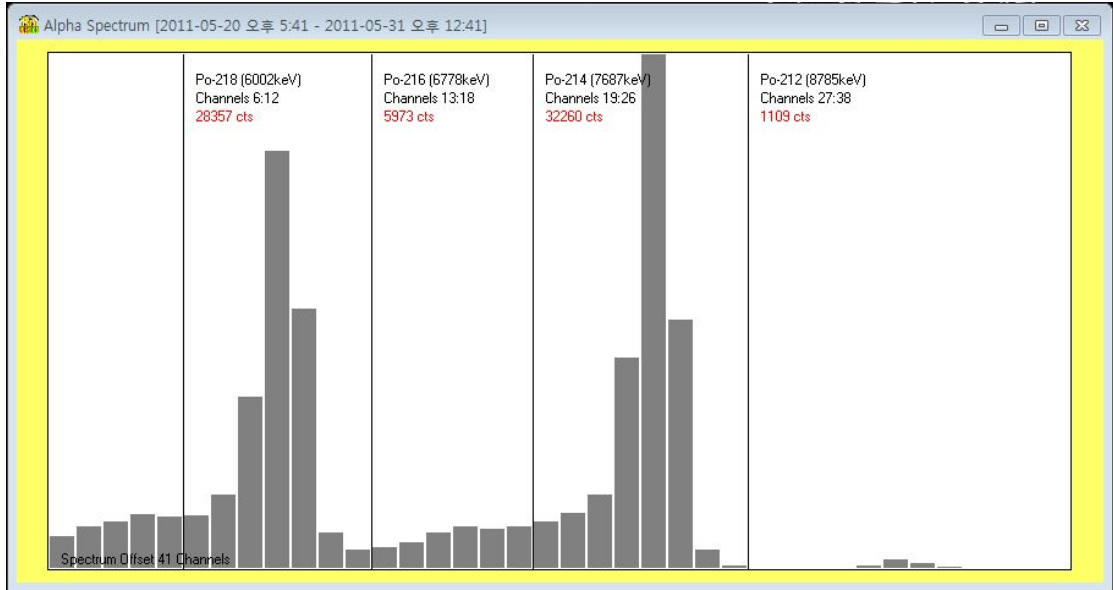


그림 2.2.6 Alpha Spectrum (시멘트계 텍스 측정)

이를 이용하여 RTM1688-2의 데이터 출력에 관한 수식은 다음과 같다.

Radon(Slow) : $1000 \cdot (R011 + R013) / (\text{Time} \cdot \text{Sensitivity})$ (R011 : Rn218 R013: Rn214)

Error : $E[\%] = 100\% \cdot k \cdot \sqrt{N} / N$ ($k = \sigma$ $N = R0E1 + R0E3$)

Radon (Fast) : $1000 \cdot (R011) / (\text{Time} \cdot \text{Sensitivity})$

Error : $E[\%] = 100\% \cdot k \cdot \sqrt{N} / N$ ($N = R0E1$)

ROI에 의한 다른 붕괴 산물과 비교해 보면, Rn^{222} 와 Rn^{220} 의 counts는 Detector에 부착되지 않기 때문에 매우 낮게 측정이 된다. 즉, Long-lived Alpha Daughters(Po^{210})는 필터를 통과시키지 않으며 Spectrum에서의 주도적인 영향을 나타내지 않는다.

핵종간의 Interval time과 통계적 Error는 다음과 같은 식에 의해서 계산되며, RTM1688의 민감도를 분석을 위해 Calibration을 해주어야 한다.⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾

$$Er = \frac{100\%}{\sqrt{T \times C_{Rn} \times E}}$$

T : Intergration time(min)

C_{Rn} : Radon concentration(Bq/m^3)

E : Efficiency of detection($cpm/kBq/m^3$) in dependence to the selected calculation mode(fast or slow)

라돈의 반감기는 3.8일로 짧기 때문에 시료 채취일자와 측정시간을 고려하여 시료 채취 후 바로 실험이 이루어졌고, RTM-1688-2 기기 2대를 이용하여 측정오차를 줄이고자 하였다. 샘플의 경우에는 시판일로부터 최근 일자의 시료로 선정하였다. 지하수의 경우에는 광주광역시를 기준으로 하여 지하수를 채취하였고, 선정된 지하수공의 시료는 비상 급수시설(음용)으로 이용되고 있다. 일부는 영광군, 영암군, 해남군, 무안군, 목포시, 남양주시, 안산시 등 비교를 위해 채취한 시료는 농업, 생활용 등으로 이용되고 있다. 시료채취는 15~20분간의 양수를 거쳐서 지하수공이 관통한 대수층의 지하수를 대변할 수 있도록 수온과 수질이 안정을 이룬 후 채취하였다.

검출 원리로는 지하수 정화 시스템 중 지하수의 흐름을 다단 유로에 의해 순연시키는 상태에서 공기에 의한 버블을 발생시켜 지하수에 포함되어 있는 우라늄 및 용존 된 자연 방사성 물질인 라돈을 제거하거나 저감하는 방법이 있는데 이와 마찬가지로 실험하고자 하는 식수 내에서 버블을 발생시켜 RTM1688-2에 라돈 기체가 포집되어 라돈에서 나오는 방사능이 측정된다. 그림 2.2.3은 버블링을 통해 라돈 모니터링을 하는 과정이다.

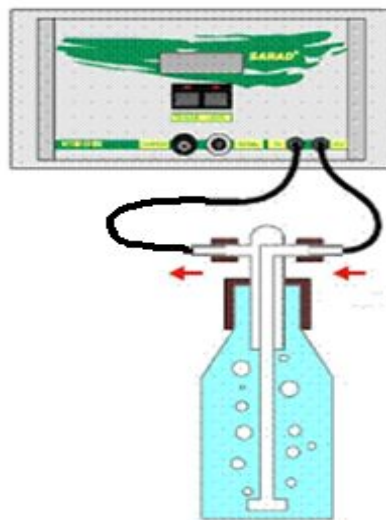


그림 2.2.7 RTM1688을 이용한 시료 내 bubbling 과정.

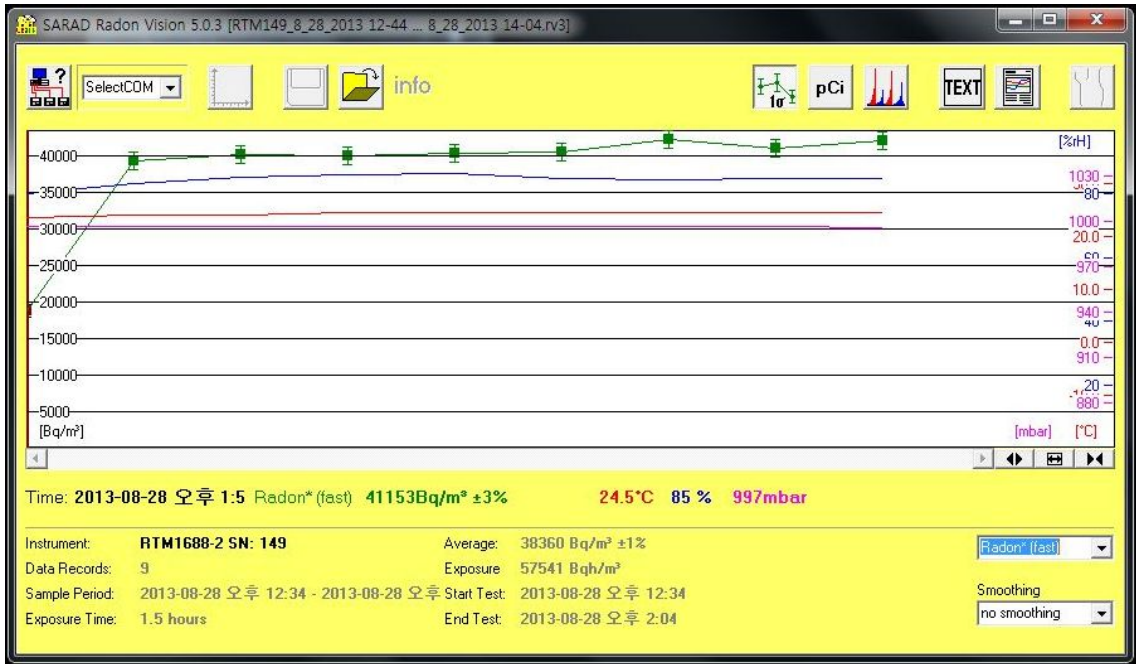


그림 2.2.8 Radon Vision 프로그램

실험을 수행하기 전 30분 안정화 및 build up을 거쳐 측정하기 전의 라돈의 평형을 맞추는 과정이 필요하다. 그 후 10분 간격으로 6번 측정 후 평균값을 기록한다. 또한, 라돈의 농도는 온도와 음의 상관성을 가지고 있기 때문에 기록한 평균값을 온도와 유로의 볼륨에 따라 보정을 해주어 Bq/m³ 을 Bq/L 로 환산해주었다. 환산한 값은 라돈의 붕괴상수를 고려하여 초기의 이론적인 농도를 구해주었다.

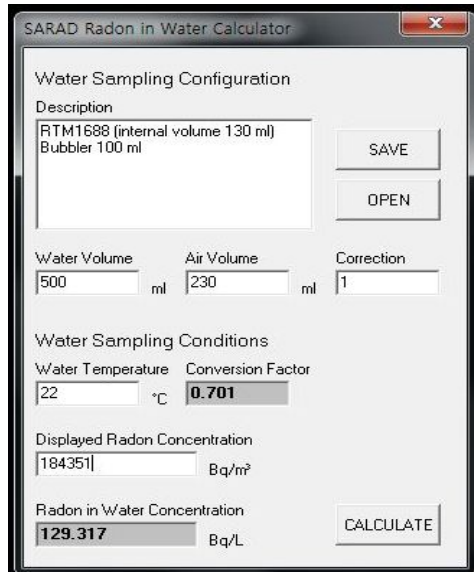


그림 2.2.9 보정계산 프로그램

제 3 절 실험 측정 결과

1. 먹는 샘물 시료의 측정 결과

먹는 샘물은 생활수준의 향상과 함께 생수의 수요가 생기기 시작하면서 다양한 형태로 발전하여 더욱 인기를 끌고 있어 일반적으로 많이 이용하고 있다. 먹는 샘물은 자연 그대로의 샘물을 그대로 담아 파는 것이 아니라, 한차례 이상의 정수처리를 하기 때문에 개봉하고 바로 음용하므로 이에 대한 라돈의 인체영향을 평가하는 것이 필요하다.

선정한 먹는 샘물의 시료는 경기도, 경상북도, 경상남도, 강원도, 전라북도, 제주도 등 전국적으로 골고루 분포될 수 있도록 대표적 먹는 샘물을 샘플링 하였다. 표 2.3.1에서는 측정결과(Bq/L)는 보정계산프로그램을 통해 나온 수치로 이를 샘물의 제조일자로부터 흐른 시간을 계산하여 이론적으로 초기의 라돈농도(Bq/L)를 계산하여 이를 pCi/L로 환산해주었다. 계산을 통해 얻은 측정결과는 41.32pCi/L~740.24pCi/L로 4000pCi/L에 비해 매우 낮은 수치를 보이므로 음용에 대해서는 문제가 없는 것으로 보인다.

표 2.3.1 먹는 샘물 시료의 측정 결과

제품명	수원지	측정결과 (Bq/L)	이론적 초기 라돈농도(Bq/L)	이론적 초기 라돈농도(pCi/L)
C-1 사	경북 상주시 화북면	0.091	1.529	41.32
G 사	경남 합천군	0.983	3.549	95.92
L 사	전북 순창군	0.142	9.926	268.27
M 사	경기도 연천군	0.262	3.575	96.62
E 사	경기도 연천군	1.922	4.759	128.62
J 사	제주특별자치도 제주시	0.464	5.103	137.92
C-2 사	강원도 철원군 근남면	17.156	27.389	740.24
P 사	평창군 봉평면	5.154	13.826	373.68

2. 지하수 시료의 측정결과

광주광역시를 기점으로 채취한 지하수는 주로 비상급수시설로 음용이나 생활용으로 이용되고 있다. 지하수에서 일부는 영광군, 영암군, 해남군, 무안군, 목포시, 남양주시, 안산시 등 비교를 위해 채취한 시료는 농업, 생활용 등으로 이용되고 있다. 암석의 라돈 농도와와의 상관관계를 정밀 분석하기 위하여 채취 및 분석하였고 1:50,000 지질도를 기준하여 조사지역의 종류별 암석을 포함하도록 하였다. 광주광역시의 라돈농도는 기준치(4000pCi/L)를 초과하는 수원지는 없지만 기준치에 근접한 광주광역시 서구 화정동A 지역에서 최고치인 3290.68pCi/L가 검출되었다. 이에 따라 인근 지역 지하수에 대한 면밀한 조사가 필요하여 화정동 B지역에서 검출한 라돈농도는 114.81pCi/L로 상당한 차이를 보인다. 또한 35.35pCi/L(남구 주월동)~3290.69pCi/L(서구 화정동A)으로 상당한 차이를 보이는 이유는 해당 대수층 시스템이나 관정의 크기가 라돈농도에 영향을 주는 큰 변수가 되기 때문이다. 대부분의 고농도라돈은 생산성이 적은(less productive) 소규모 개인 관정에서 나타나고 대규모 공공관정의 경우 라돈농도가 낮다. 대규모 관정의 경우에는 저류시설 및 양수저장시설의 확충으로 적게 나타나지만 소규모 관정의 경우 이러한 시설의 설치가 되지 아니하여 지하수 혼합(mixing) 및 희석(dilution)의 가능성이 적으며 지하수의 저류 및 혼합의 영향이 적어 높은 농도가 나타남을 일부 확인할 수 있었다.¹⁾ 즉, 지하수공 관정의 깊이와 형태에 대한 조사 및 연구가 필요하다.

비교지역의 지하수 내 라돈함량을 분석한 결과, 비교수원지 또한 미국 EPA가 설정한 음용수 기준치인 4000pCi/L를 초과하는 수원지는 없어 음용에 대해 문제가 없는 것으로 보인다.

표 2.3.2 광주광역시 지하수내 라돈농도

수원지		측정결과(Bq/L)	이론적 초기 라돈농도(Bq/L)	이론적 초기 라돈농도(pCi/L)
광산구	신창동	57.164	61.991	1675.43
	임곡동 A	11.455	12.035	325.27
	임곡동 B	3.521	3.551	95.97
	왕동	27.106	27.626	746.65
	월계동	3.521	3.61	97.57
북구	두암동 A	20.607	20.854	563.62
	두암동 B	8.859	8.975	239.432
	용봉동	26.421	26.697	721.54
동구	서석동 A	48.652	49.4598	1336.75
	서석동 B	32.485	32.728	884.54
	서석동 C	42.381	42.672	1153.30
	지산동	11.789	11.882	321.14
서구	풍암동	26.318	26.519	716.73
	화정동 A	119.161	121.755	3290.68
	화정동 B	3.926	4.248	114.81
	쌍촌동 A	82.108	83.123	2246.57
	쌍촌동 B	39.009	45.029	1217
	농성동	11.455	12.035	325.27
	금호동	12.552	13.096	353.95
	벽진동	11.225	11.734	317.14
남구	주월동	4.168	1.308	35.35
	봉선동	47.641	47.998	1297.24
	진월동	16.374	16.614	449.03

표 2.3.3 광주광역시 서구 화정동 A 지하수내 라돈농도

수원지		측정결과(Bq/L)	이론적 초기 라돈농도(Bq/L)	이론적 초기 라돈농도(pCi/L)
서구	화정동 A	34.359	58.403	928.62
		37.775	64.210	1020.95

위의 표는 미국 EPA가 설정한 음용수 기준치인 4000pCi/L에 근접한 수치가 나온 화정동 A를 재측정 한 수치이다. 수치를 보면 처음 측정했을 때보다 상당한 차이를 보이고 있는데 이는 여러 변수로 인한 가능성이 크다.

표 2.3.4 비교지역의 지하수내 라돈농도

수원지		측정결과 (Bq/L)	이론적 초기 라돈농도(Bq/L)	이론적 초기 라돈농도(pCi/L)
전라남도 영광군	불갑면 모악리	110.997	113.485	3067.16
전라남도 나주시	경현동 금성산	9.415	10.1881	275.35
전라남도 목포시	양을산	40.501	41.210	1113.78
	유달산	3.365	3.789	102.41
전라남도 무안군	삼향읍 임성리	85.151	90.949	2458.08
전라남도 영암군	미암면 춘동리	50.833	61.884	1672.54
	미암면 남산리1	51.811	55.578	1502.11
	미암면 남산리2	122.268	123.357	3333.97
	미암면 춘동리	79.767	81.318	2197.78
전라남도 해남군	북일면 만수리	114.444	123.262	3331.41
충청남도 부여군	부여읍 쌍북리	60318	7.174	193.89
경기도 남양주시	진접읍 내각리	18.519	23.573	637.11
경기도 안산시	상록구 사동	18.138	22.196	599.89
	상록구 수암동	7.824	7.914	213.89
	북곡동	20.805	26.233	709
	성포동	24.605	32.026	865.57

3. 지질과의 상관관계 조사

지질은 크게 결정질암과 퇴적암으로 구분할 수 있는데 결정질암은 다시 화성암과 변성암으로 대별한다. 화성암은 크게 화강암 등의 산성암과 현무암 등의 염기성암으로 구분되는데 대체로 산성암에서 우라늄의 농도가 높으며 염기성암은 낮은 우라늄 농도를 보인다. 그 결과 라돈의 농도도 유사한 경향을 가진다. 변성암의 생성원인은 두 가지로 열변성(접촉변성작용)과 압력변성(광역변성작용)으로 나뉘는데 지하수내 라돈의 함량은 어떤 변성작용을 받았느냐보다는 변성 전 모암의 원래 조성에 크게 좌우된다. 한편 퇴적암 중 석회암과 같은 탄산염암의 경우 낮은 라돈함량을 보인다. 쇄설성 퇴적암과 비고화 퇴적물의 경우 라돈함량은 어떤 모암조성(original composition)으로부터 유래되었느냐에 따라 달라진다. 예를 들어 화강암의 물리적 풍화에 의해 형성된 화강사암 혹은 퇴적물의 경우 상대적으로 높은 라돈 함량을 보인다.¹⁾ 국내 지하수의 자연방사성물질 함량에 대한 최초의 전국적인 규모의 조사는 1999년부터 2002년까지 및 2006년부터 2007년까지 지하수의 자연방사성물질 함량 실태조사가 국립환경과학원과 한국지질자원연구원에 의해서 이루어져 왔다. 환경부의 조사결과에 따르면, 우리나라와 유사한 지질 환경을 가지고 있는 외국의 지하수의 우라늄, 라돈 함량에 비해서 국내 지하수의 우라늄, 라돈 함량은 대체적으로 낮으며, 퇴적암이나 변성암 지역 지하수에 비하여 화강암류 지역 지하수에서 우라늄과 라돈 함량이 높은 것으로 보고된 바 있다. 자연방사성물질의 지질별 함유특성 조사결과 국내 지하수에서 라돈의 함량은 화강암>변성암>육천계 변성암>퇴적암>화산암 지하수 등의 순으로 감소한다고 한다. 라돈은 화강암과 화강편마암 계열에서 높았으며 특히, 백악기흑운모화강암지역에서 최고 높은 함량을 나타냈다.¹²⁾

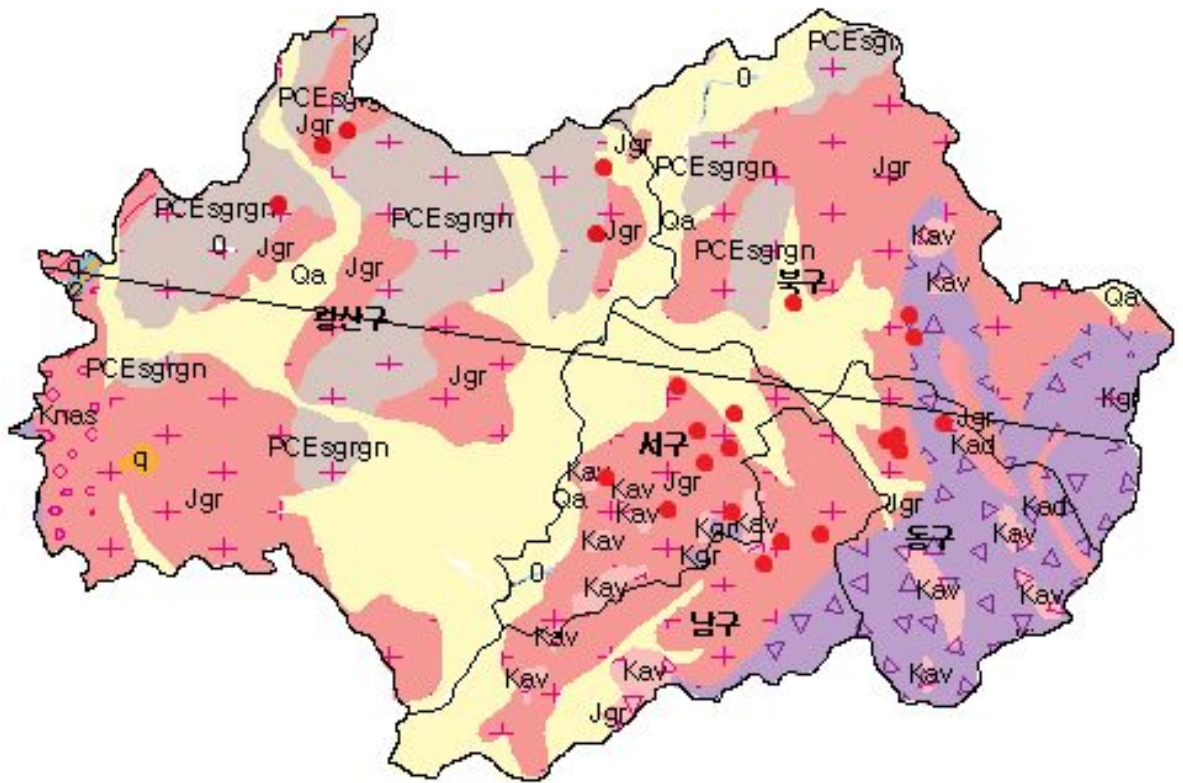


그림 2.3.1 광주광역시 지질주상도

표 2.3.5 광주광역시 암상

암상	지질시대	지층명	대표암석
Qa	신생대 제 4기	충적층	흙, 모래, 자갈
PCEsgrgn	선캄브리아기	소백산편마암복합체화강편	화강편마암
Jgr	중생대 쥬라기	대보관입암류화강암류	화강암류
Kav	중생대 백악기	경상누층군유천층군산성화산암	화산암류

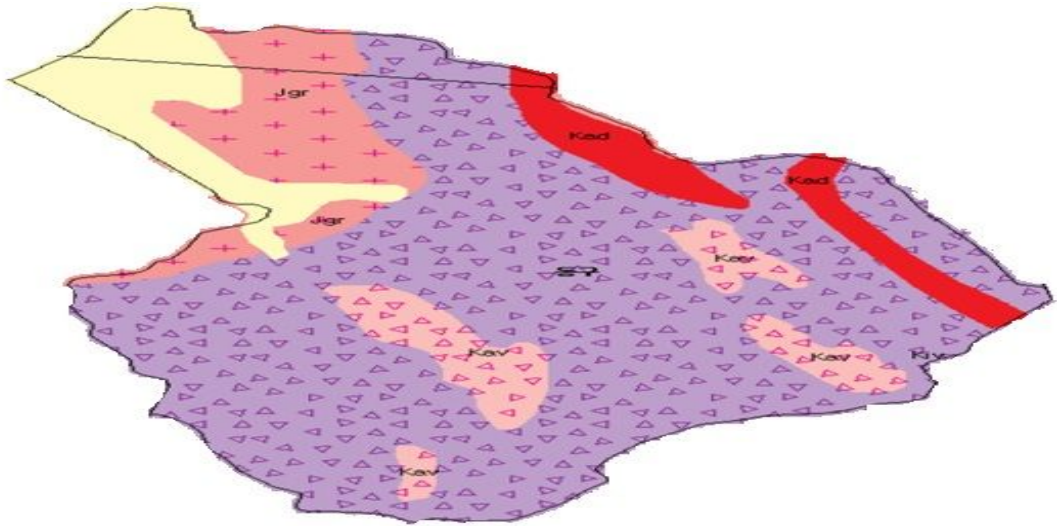


그림 2.3.2 광주광역시 동구 지질주상도

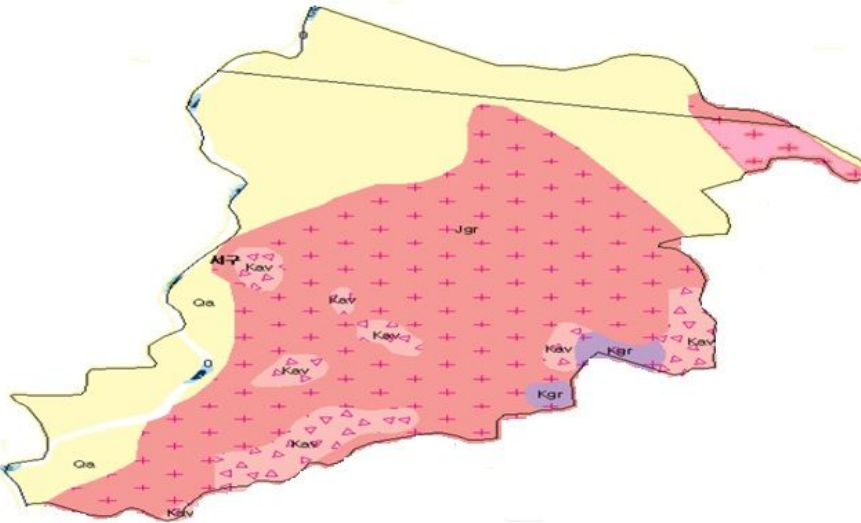


그림 2.3.3 광주광역시 서구 지질주상도

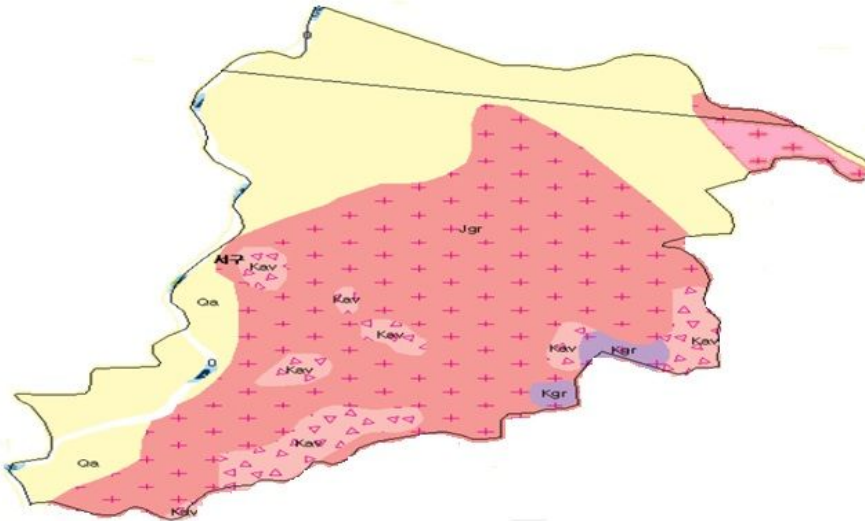


그림 2.3.4 광주광역시 남구 지질주상도

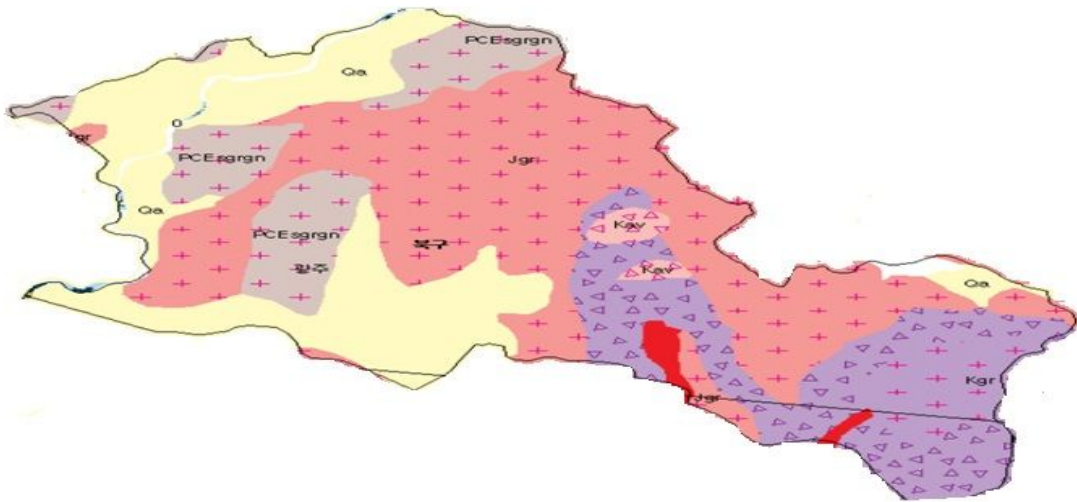


그림 2.3.5 광주광역시 북구 지질주상도

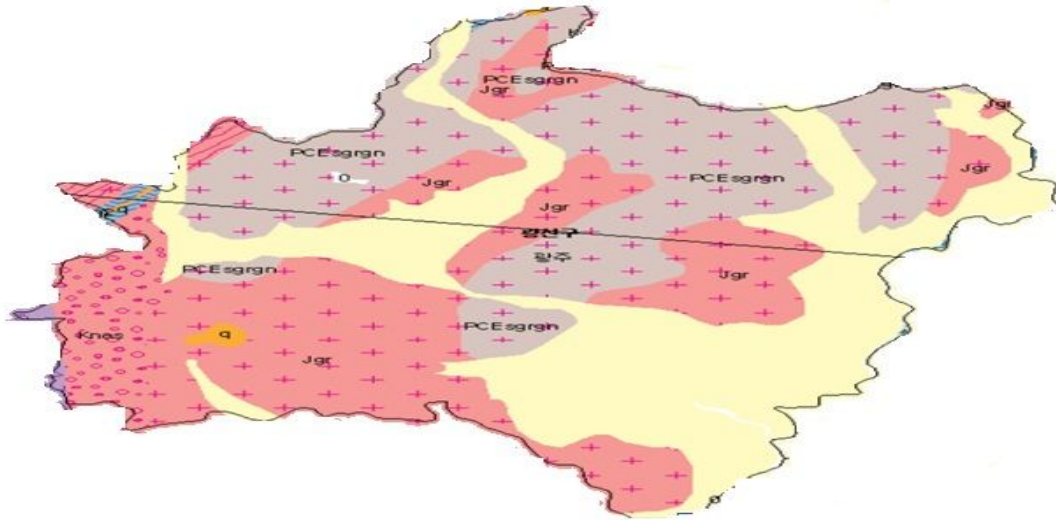


그림 2.3.6 광주광역시 광산구 지질주상도

광주광역시는 주로 흙, 모래, 자갈 등으로 이루어진 Qa(충적층)과 화강암류인, Kav(유만암 및 유문암질응회암)로 이루어져 있다. 서구 화정동A(3290.69pCi/L)>서구 쌍촌동A(2246.57pCi/L)>광산구 신창동(1675.43pCi/L)>동구 서석동A(1336.75pCi/L)>남구 봉선동(1297.24pCi/L)을 보여 서구에서 대체적으로 높은 라돈이 검출되었는데 서구지역은 주로 Jgr(대보관입암류 화강암류)로 이루어져 있다. 광주광역시 내의 높은 라돈농도를 보이는 지역은 주로 PCEsgrgn(화강편마암), Jgr(대보관입암류 화강암류)로 이루어진 지역으로 기존에 보고된 자료를 바탕으로 화강암계통 지역에서 라돈의 함유상태가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

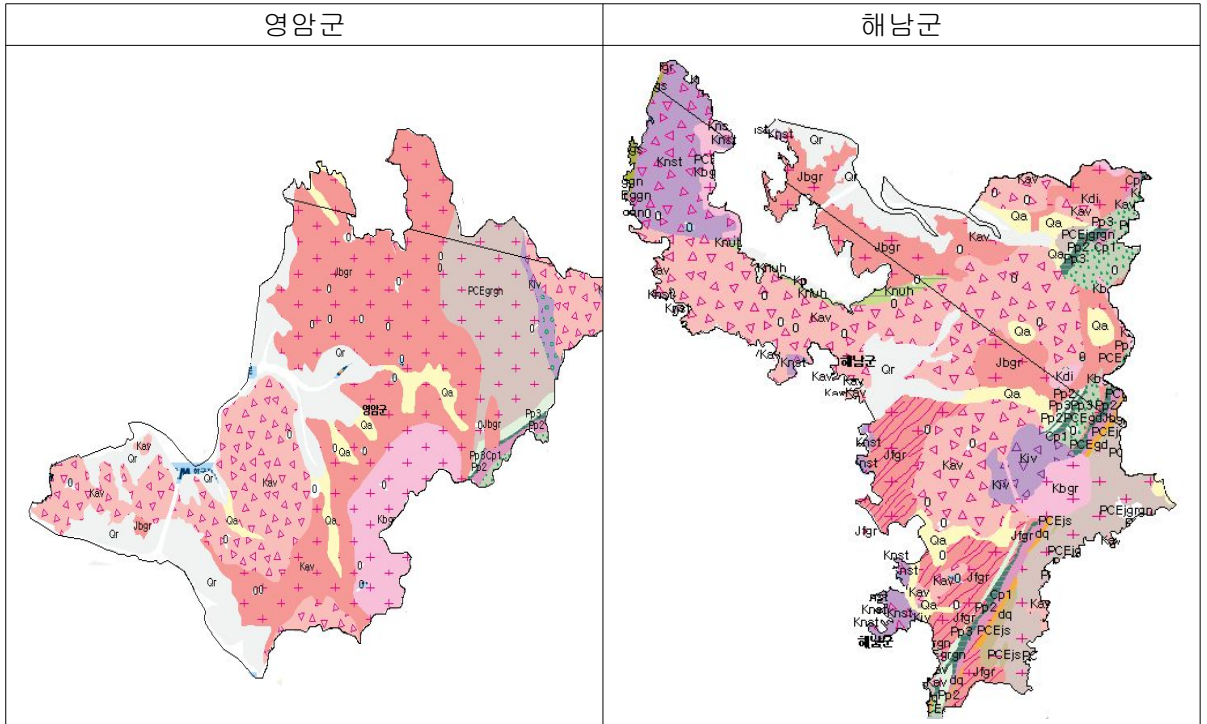


그림 2.3.7 영암군과 해남군의 지질주상도

표 2.3.6 비교지역 암상

암상	지질시대	지층명	대표암석
Qa	신생대 제 4기	충적층	흙, 모래, 자갈
PCEgrgn	선캄브리아기	육천대 화강편마암	화강편마암
Jbgr	중생대 쥐라기	흑운모화강암	흑운모화강암
Kav	중생대 백악기	유문암 및 유문암질응회암	유문암 및 유문암질응회암

영암군과 해남군의 지질은 주로 Kav(유문암 및 유문암질응회암) Jbgr(흑운모화강암)의 화강암류 암반으로 이루어져 있어 기존 보고된 것을 바탕으로 Jbgr에서 높은 라돈 함량을 확인할 수 있다.

제 4 절 국민 피폭선량

음용수로부터 섭취된 라돈은 소화기계통을 거쳐 인체의 혈액 속으로 흡수, 순환되면서 인체 내 다른 장기들로 이동, 축적한다. 이러한 과정들을 해석하여 식수 내에 존재하는 라돈을 인체가 섭취하는 경우, 기존에 보고된 섭취된 라돈의 인체 내 거동을 평가하는 수학적 모델로 정량적인 인체축적량을 평가하며 국민 피폭선량을 계산해보고자 한다. 현실적인 음용수 섭취 시나리오를 바탕으로 하여 라돈의 인체 내 축적현상을 보다 논리적으로 평가하고자 하였다.

1. 음용수를 통한 라돈 섭취

음용수를 통한 라돈의 섭취는 소화기계통을 통해 섭취되는 라돈이 혈액 속으로 들어 오기까지의 과정을 모의하기 위해 소화기계통을 크게 4종류의 구역(compartment), 즉 위장(stomach), 소장(small intestine), 상부대장(upper large intestine), 그리고 하부대장(lower large intestine)으로 이루어져 있다고 가정하였다. 물에 용해되어 있는 라돈은 위장으로부터 위장벽(stomach wall)을 통해 혈액내로 흡수되어 우선적으로 간장으로 순환되며 궁극적으로 체내 모든 장기속을 순환하게 된다고 가정하였다.¹³⁾ 각 구역에서 물이 머무는 평균 시간은 ICRP-30에서 사용한 값을 참조하였다.³⁾

표 2.4.1 장내 물 체류 평균 시간(ICRP)¹³⁾

Tissue group	Mean residence time(hours)
Stomach	1
Small intestine	4
Upper large intestine	13
Lower large intestine	24

초기 음용수 내의 라돈의 방사선량을 A_{st}^0 라고 하면 위장에서 라돈의 물질수지방정식은 아래와 같이 표현될 수 있다.²⁸⁾

$$\frac{dA_{st}}{dt} = -(K_{st} + K_{stw} + \lambda_R)A_{st}, \quad A_{st}(0) = A_{st}^0$$

K_{st} = 위장에서 소장으로의 시간당 이동계수

K_{stw} = 위장벽으로 흡수되는 시간계수

λ_R = 라돈의 방사학적 붕괴상수

2. 분석결과

본 연구에서 사용한 인체노출평가 시나리오는 다음과 같이 기준경우를 가정하였다. 기준경우는 미국 환경부가 가정한 일반 성인남자의 하루 중 음용수를 섭취하는 패턴은 8시간 간격으로 하루 3번으로 가정하고 하루 24시간 중 8시간을 취침한다고 고려하였다. 선정된 음용수는 최악의 경우를 가정하여 먹는 샘물의 경우 C-2 사, 광주광역시 지하수는 화정동 A 지역의 지하수, 비교 지역의 영암군 남산리 2의 지하수를 선정하여 시간에 따른 라돈농도의 변화를 나타내었다.

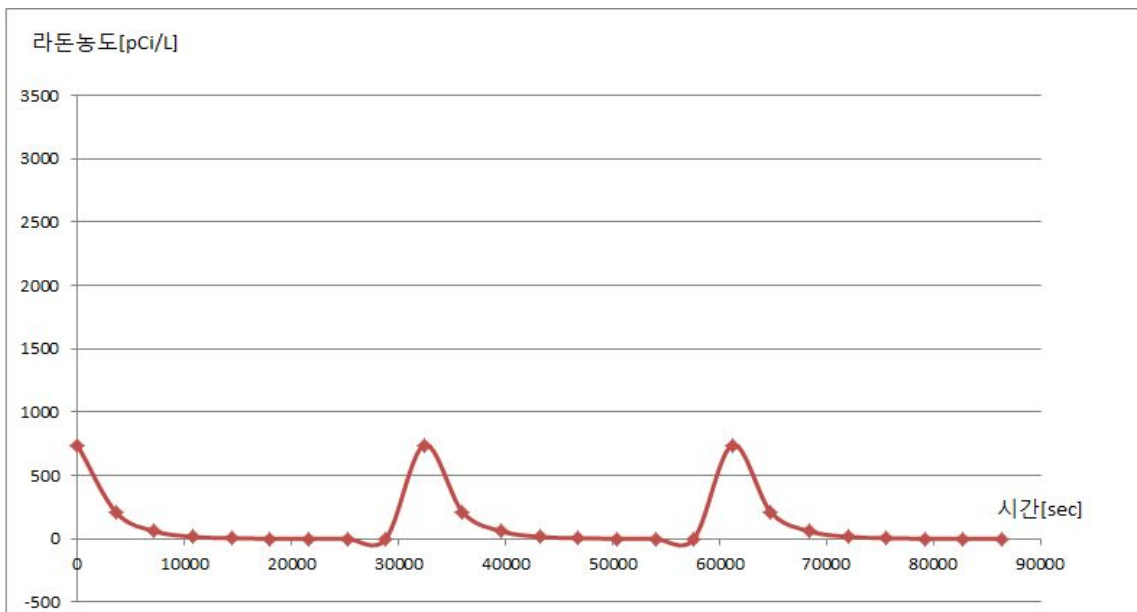


그림 2.4.1 시간에 따른 먹는 샘물(C-2 사) 내의 라돈 농도

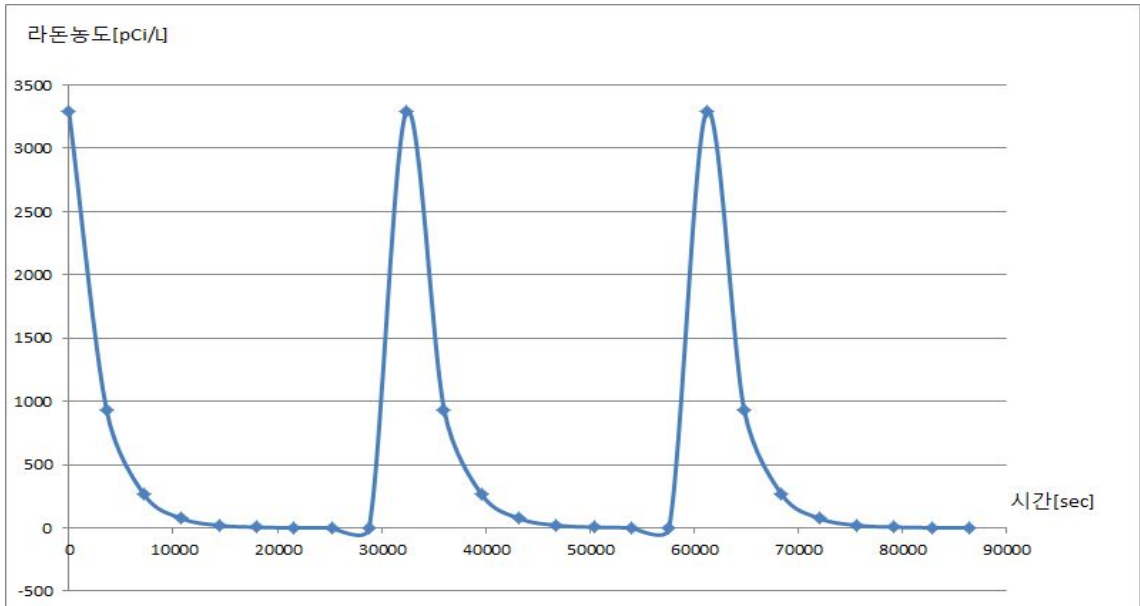


그림 2.4.2 시간에 따른 광주광역시(화정동 A) 지하수 내의 라돈농도

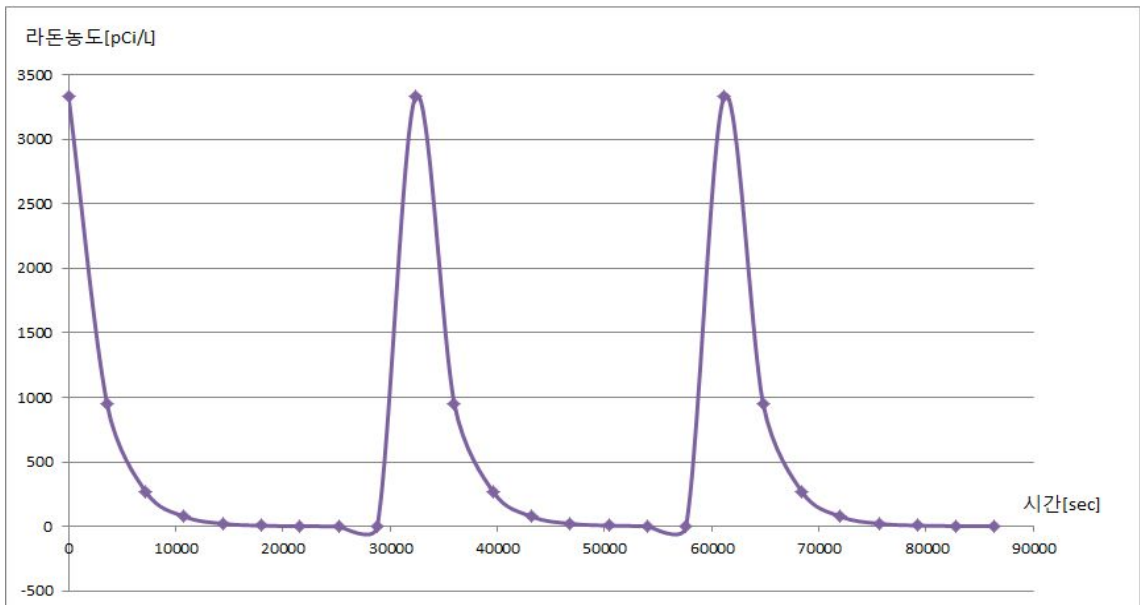


그림 2.4.3 시간에 따른 비교지역(영암군 남산리2) 지하수 내의 라돈농도

음용수 섭취 시 위장벽으로부터 라돈의 흡수가 빠른 속도로 일어나 혈액을 통해 다른 장기로 이동하면서 라돈농도가 점차 낮아짐을 알 수 있다(그림 2.4.1, 그림 2.4.2, 그림 2.4.3). 기존 연구 내용과 마찬가지로 이런 상태는 다음번 섭취 시에도 반복되어 위장벽에서의 라돈농도는 마치 톱날형태의 분포형태를 보이고 있다.¹⁴⁾

위 인체노출평가 시나리오는 하루 24시간 중 8시간에 걸쳐 음용수를 2번의 섭취를 가정하고 있다. 하지만 실제로 대부분의 하루 음용수 섭취 양과 횟수는 불규칙하게 이루어지기 때문에 실험군을 설정하여 일일 평균 권장량 2L를 섭취할 때 소화기관으로의 흡수량과 라돈농도에 관한 연구가 더 필요하며 위 시나리오는 미국 환경부 주관으로 이루어져 있어 국내에서의 인체노출평가 시나리오 연구가 이루어져야 한다.

제 3 장 결 론 및 고 찰

실험 결과 자료를 보면 먹는 샘물의 경우에는 41.32pCi/L ~ 740.24pCi/L로 4000pCi/L에 비해 매우 낮은 수치를 보이므로 음용에 대해서는 문제가 없는 것으로 보인다. 광주광역시 지역의 라돈농도는 서구 화정동A(3290.69pCi/L)>서구 쌍촌동A(2246.57pCi/L)>광산구 신창동(1675.43pCi/L)>동구 서석동A(1336.75pCi/L)>남구 봉선동(1297.24pCi/L) 등의 결과를 보였고, 비교지역의 지하수 내 라돈함량을 분석한 결과 영암군 미암면C(3333.97pCi/L)>해남군 북일면(3331.41pCi/L)>영광군 불갑면(3067.16pCi/L)>무안군 삼향읍(2458.08pCi/L)>영암군 미암면D(2197.78pCi/L)>영암군 미암면A(1672.54pCi/L)>영암군 미암면B(1502.11pCi/L)>전라남도 목포시(1113.78pCi/L) 등의 분포를 보였다. 지하수 내의 라돈함량의 상관성이 높은 것은 조사가 대부분 암석인 화강암에서 이루어졌기 때문이라 판단된다. 하지만 같은 지역에도 불구하고 상당한 차이를 보이는 것은 해당 대수층 시스템이나 관정의 크기가 라돈농도에 영향을 주는 큰 변수가 되기 때문이다. 각 수원지 별 지하수의 라돈의 함량 값에 대한 연구만 수행하였으나 향후 통일된 관정을 통하여 각 수원지 별 지하수에 대한 주성분 분석 및 암반에 대한 추가 분석이 필요하고 온도의 영향을 고려한 연구가 이루어져야한다. 또한, 먹는 샘물을 포함한 지하수 내의 라돈농도는 모두 미국 환경청의 대안최대허용수준인 4,000pCi/L에 비해 현저히 낮아 음용에 문제가 없어 보인다. 이는 라돈방사능 위해도 평가 및 관리기준 마련의 근거로 이용이 가능하고 라돈의 위해성에 대한 국민건강의 안전성과 이에 대한 인식의 확대를 목표로 할 수 있을 것이다.

본 연구에서 측정된 지하수의 라돈함량은 대표 값이라 말할 수 없는데 계절별 온도 변화, 관정이나 대수층 시스템 차이 등 많은 변수에 따른 분석이 어렵기 때문이다. 추후 장기적으로 여러 차례에 걸쳐 반복적인 측정을 통해 평균적인 값이 필요하다. 현재 대기 중 라돈농도에 관한 연구는 이미 기존에 많이 이루어져 측정이 용이하지만 음용수 내의 라돈농도를 결정하기 위해서는 관련기준을 설정하고 조사 및 분석방법 지침 등이 이루어지지 않아 이에 대한 연구가 미비한 실정이며 정확한 조사 또한 필요하다. 따라서 지하수 및 먹는 샘물의 원수에 대한 체계적인 라돈관리를 통해 정밀한 검사와 측정 및 연구가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 지하수내 우라늄, 라듐과 라돈의 발생, 건강위해 및 저감방법에 대한 고찰(이진용 지질학회지 2008)
- [2] 남원 내기마을 지하수 라돈오염으로 인한 암발생(환경부 2013.9)
- [3] 생활환경 중의 방사선 영향평가(한국원자력 안전 기술원 2011)
- [4] 라돈 측정 장비 검·교정 규격 마련을 위한 연구(환경부 2008)
- [5] http://navercast.naver.com/contents.nhn?rid=44&contents_id=27699 네이버캐스트
- [6] 국내외 라돈정책 및 라돈산업의 현황(제현국 한국지구시스템공학회지 2010)
- [7] 생활주변 건축자재로부터 대기로 방출되는 라돈-222 농도측정(주용진 조선대학교 대학원 2012.2)
- [8] RTM1688-2 user manual
- [9] 전주시 아파트 라돈농도의 측정 및 분석(한일수 전북대학교 대학원 2006)
- [10] 실내 라돈 측정에 있어서 실내공간의 체적과 측정되는 라돈농도의 상관관계 연구(강성아 전북대학교 대학원 2007)
- [11] 딸핵종의라돈 및 라돈 시공간적 모니터링과 상관성 분석(정재형 서울산업대학교 에너지환경대학원 2008)
- [12] 지하수에 우라늄, 라돈 등 자연방사성물질 함유(환경부 2011.8)
- [13] Limits for Intakes of Radionuclides by workers(ICRP ICRP Publication-30 1979)
- [14] 음용수를 통한 라돈 섭취시 정량적인 인체축적량 평가(유동한 이창우 대한환경공학회지2001)

감사의 글

어느새 2년의 대학원 생활이 보내고 결실인 논문을 끝마치고 나니 그 동안 도움을 주신 많은 감사한 분들이 생각납니다.

대학원 생활동안 부족한 실력을 가진 저에게 많은 관심과 격려를 아끼지 않으신 정운관 지도교수님께 진심으로 감사드리며, 논문을 심사해주신 이경진 교수님, 송종순 교수님께도 감사드립니다. 그리고 늘 따뜻한 관심으로 지켜봐주시며 많은 조언을 해주신 나만균 교수님, 김진원 교수님께도 감사드립니다.

논문을 준비하는 저에게 많은 도움과 조언을 주신 용진오빠, 희재, 동경래 교수님, 양남희 선생님께 감사의 마음을 드립니다. 그리고 학업을 하면서 격려를 아끼지 않았던 하진이, 태현이, 진선이, 익준이, 유림이, 미연이, 신애, 민경이, 지수, 그리고 한해 동안 가장 가까이에서 항상 선뜻 나서서 도움을 주었던 민애에게 깊은 감사를 드립니다. 그리고 이외에도 미처 언급하지 못한 여러 선후배들과 고마우신 분들께도 감사드립니다.

1년 동안 사이클로트론연구소에서 일하면서 많은 실수도 하였지만 저에게 많은 지도와 조언을 주신 정철기 실장님과 김대석 팀장님, 이현 선생님, 박유진 선생님께도 감사하다는 말을 전해드리고 싶습니다.

또한 대학생활 시작하면서부터 항상 옆에서 많은 도움과 즐거움을 준 송은주에게 많이 고맙고 나의 가까운 지인들인 쫘지, 가희, 승연언니, 앵언니, 우리언니에게 감사드립니다. 대학원 생활하는 동안 힘들어 주저앉고 싶을 때 마다 일으켜주시고 힘을 주신 사장님, 사모님, 그리고 영금언니, 은채선배, 성향이에게 깊은 감사를 드립니다.

마지막으로 못한 저에게 저를 믿고 힘이 되어준 내 동생 지현이 그리고 항상 저를 응원해주시고 지켜주시며 힘이 되어주시는 아빠, 엄마에게 고마움과 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다.

이제 저는 작은 결실 하나를 맺었습니다. 이 작은 결실을 시작으로 다시 또 험하고 먼 길을 준비하려합니다. 하지만 이제까지 저에게 도움을 주시고 이끌어 주신 분들을 믿으며 앞으로 잘 해나갈 수 있을 것이라고 믿습니다. 더욱 성숙한 모습으로 발전해 나가며 도움이 될 수 있는 사람이 되도록 노력할 것입니다.

다시 한번 도움을 주신 모든 분들께 감사드립니다.

2014년 12월

김정하 올림