



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

2016年 8月

博士學位 論文

환경시료 분석을 통한 라돈 분포특성
및 영향평가 방법론 연구

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

朱 勇 珍

환경시료 분석을 통한 라돈 분포특성 및 영향평가 방법론 연구

Study of Radon Distribution and its Impact Assessment
Methodology

2016年 8月 25日

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

朱 勇 珍

환경시료 분석을 통한 라돈 분포특성 및 영향평가 방법론 연구

指導教授 鄭 運 官

이 論文을 原子力工學 博士學位申請 論文으로 提出함

2016年 4月

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

原 子 力 工 學 科

朱 勇 珍

朱勇珍의 博士學位論文을 認准함

委員長 韓國原子力研究院 博士 金振奎 (印)

委員 朝鮮大學校 教授 李庚鎭 (印)

委員 朝鮮大學校 教授 宋鐘淳 (印)

委員 光州保健大學校 教授 董京來 (印)

委員 朝鮮大學校 教授 鄭運官 (印)

2016 年 6月

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT	vi
제1장 서론	1
제2장 본론	4
제1절 이론적 고찰	4
1. 라돈의 특성	4
2. 라돈의 모핵종 및 자핵종의 특성	4
3. 라돈의 위해성	8
제2절 지하수 라돈농도측정	13
1. 측정 장비 및 방법	13
2. 라돈농도 실험결과	27
3. 지질과의 상관관계 조사	27
제3절 토양 라돈농도측정	34
1. 측정 장비 및 방법	34
2. 라돈농도 실험결과	39
제4절 건축자재에서의 라돈농도측정	43
1. 측정 장비 및 방법	43
2. 라돈농도 실험결과	49
3. HPGe 분석결과	50

제5절 실내 라돈농도측정	53
1. 측정 장비 및 방법	53
2. 실내 라돈농도 실험결과	56
제6절 광주광역시 라돈위험도	59
제3장 고찰	60
제4장 결론	62
참고문헌	64

표 목 차

Table 1. Decay characteristics of the short-lived daughter nuclides with Rn222	5
Table 2. Radon Risk if you smoke	9
Table 3. Radon Risk if you' ve never smoke	9
Table 4. International regulation level of radon	12
Table 5. Hourly measurements radon concentrations samples	24
Table 6. Radon concentrations in underground water Water sources	29
Table 7. Gwangju geological data	31
Table 8. Underground water radon concentrations	32
Table 9. Gwangju underground water radon concentrations	33
Table 10. Gwangju representative geological and distribution	34
Table 11. Soil radon measurement points	36
Table 12. Radon concentrations measured by the point	40
Table 13. Geological soil radon concentration	41
Table 14. List of construction material samples	43
Table 15. Tex Gypsum radon release rate measurements	49
Table 16. Cement radon release rate measurements	49
Table 17. Construction materials HPGe results	50
Table 18. Construction materials risk assessment	52
Table 19. Administrative districts by indoor radon concentrations	56
Table 20. Radon Concentration in Living	57
Table 21. Radon concentration in a residential floor	58

그림 목 차

Figure 1. Uranium (U 238) decay map.	6
Figure 2. Thorium (Th 232) decay map.	7
Figure 3. Radon funnel.	10
Figure 4. Indoor radon enters route.	11
Figure 5. RTM1688-2.	14
Figure 6. RTM1688 measurement system schematic.	15
Figure 7. Radon chamber operation.	15
Figure 8. RTM1688 Block diagram.	16
Figure 9. Radon chamber step response.	17
Figure 10. Alpha Spectrum.	18
Figure 11. Sample bubbling process using RTM1688.	20
Figure 12. Radon Vision Program.	21
Figure 13. Correction calculation program.	22
Figure 14. Hourly measurements radon concentrations in the sample.	23
Figure 15. Rainfall and underground water containing radon concentrations in comparison.	25
Figure 16. Gwangju underground water intake point.	26
Figure 17. Analysis schematic estimate underground water radon levels.	28
Figure 18. Underground water intake point and geologic maps.	30
Figure 19. Soil radon measurement Scene.	35
Figure 20. Soil radon measurement location.	37
Figure 21. Soil radon measurement location and geologic maps.	38
Figure 22. Analysis schematic estimate soil radon radon levels.	42
Figure 23. Ra226 Radionuclides to Rn222 radionuclide to decay and Build-up period.	45
Figure 24. Using the experimental device and experimental scene samples.	46
Figure 25. RTM1688-2 instrument program Radon Vision4	48
Figure 26. Radon cup (alpha track) and solid-state track detector (LR-115).	53

Figure 27. Indoor radon cup attached example. 55
Figure 28. Indoor radon concentration distribution. 57
Figure 29. Gwangju radon risk map. 59

ABSTRACT

Study on radon concentration measurement and risk assessment : focused on Gwangju

Ju, Yong - jin

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

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

Due to urbanization, industrialization modern citizens live most of the day indoors. As time for activities indoors gets longer, the importance regarding the pollution of indoor environment can be recognized and pollution of indoor environment can be said to be an important factor which has a harmful effect on human health. Contained in floors, ceilings or surrounding soil or walls of buildings, radon of indoor air pollution sources seeps into the building gap and comes into the body when breathing, increasing exposure dose and also causes various cancers. For this radon, we were to investigate the distribution characteristics of the radon concentration in soil and groundwater in Gwangju and carry out a radon investigation for Gwangju through the feature analysis of indoor radon concentration and building materials.

Radon contained in groundwater through 25 tubular wells was measured and as a result, radon of 1 tubular well is 121.76 Bq/L, exceeding the WHO criterion (100 Bq / L) and that of 20 tubular wells exceeded U.S. EPA drinking water standard concentration(11.1 Bq/L) and higher radon concentrations were shown in tubular wells whose basement rock is granite.

In the case of radon among soil pores, the measurement was performed targeting 28 points and average $25,000 \text{ Bq/m}^3$ level was shown and some points showed maximum $125,365 \text{ Bq/m}^3$ and generally, higher radon concentrations were shown in granites.

For building materials, three kinds of cement and three kinds of plaster tex were analyzed and plaster tex and cement showed the radon radiation of $47.07 \sim 232.78 \text{ Bq/kg} \cdot \text{h}$ and the radiation of $7.25 \sim 10.15 \text{ Bq/kg} \cdot \text{h}$, respectively. Radium equivalent activity, external exposure hazard index and absorbed gamma dose rate through HPGe analysis also showed less than the standard value.

For indoor radon, 10 households out of 74 households exceeded 74 Bq/m^3 , a US recommended home repair figure and even if one of them exceeded indoor air limit 148 Bq/m^3 , the average is $42.5 \pm 29.8 \text{ Bq/m}^3$, showing a figure lower than the national average.

These radon distribution characteristics of Gwangju were examined and as a result, risk seems to be insignificant except for groundwater but given that most water intake points of groundwater exceed the US drinking water standard, drinking limit, reduction and measures seem to be urgent when approving and permitting groundwater tubular wells in granite bedrock areas.

제 1 장 서 론

방사선은 인공방사선(artificial radiation)과 자연방사선(natural radiation)으로 분류되며, 인공방사선은 방사선 진단, 항암치료에 사용되는 방사선이나 원자력시설에서 나오는 방사선으로, 사람이 인공적으로 만들어낸 방사선을 지칭하고, 자연방사선은 암석 및 토양 등 자연에서 방출되는 방사선을 말하며, 지각방사선, 우주방사선 등이 있다[1].

대한민국 국민은 1년 동안 평균 3.73 mSv의 방사선피폭을 받고 있으며, 이중 자연적으로 존재하는 방사선은 80%이며, 의료피폭은 20% 정도고, 자연방사선의 대부분은 라돈(45%)이 차지한다[2].

대표적인 자연방사성 물질인 라돈(Rn-222)은 자연에 존재하는 암석이나 토양 중에 우라늄(U-235, U-238)과 토륨(Th-232)이 방사성 붕괴 후 생성되는 방사성동위원소이다[3]. 불활성 기체로 무색, 무취, 무미의 특징을 가지고, 상대적으로 긴 반감기를 가지고 있어 충분한 시간 동안 공기 중에 머물러 있는 특성이 있다[4].

라돈 가스는 건축물의 벽이나 바닥, 천장 혹은 주변 흙 등에 포함되어 있다가 건물 틈새로 스며들고, 밀폐된 공간에서 우라늄이 함유된 건축자재는 공기 중의 라돈 농도를 더 높일 수 있으며, 이러한 라돈을 호흡하면 체내로 들어와 피폭선량을 증가시키며 폐암을 유발시키기는 한 원인이 될 수 있다[5].

현대 도시인들은 도시화, 산업화로 인하여 하루 생활 중 80% 이상 실내에서 할애하고, 특히 가정주부들과 노약자들은 하루 90% 이상을 실내에서 생활한다[6].

이러한 현대인들의 실내에서 활동 하는 시간이 길어지는 추세에 따른 실내 환경의 오염에 관한 중요성이 대두되었으며, 실내공기의 오염은 인간의 건강에 유해한 영향을 미치는 주요한 인자라고 할 수 있다[7].

국내 공기청정기 판매액이 2013년 3000억 원, 2014년 5000억 원, 2015년 6000억 원으로 꾸준히 증가 추세를 증가하는[8] 것을 보아도 실내 공기 오염에 대한 국민 인식이 더 높아짐을 유추 할 수 있다. 하지만 국민들의 실내공기질에 대한 관심은 미세먼지나 새집증후군에 연관된 포름알데히드와 같은 휘발성 유기화합물에 집중되어 있다. 때론 언론매체를 통하여 라돈가스의 위험성이 소개되지만 잠시 관심이 집중되는 것 또한 현실이다.

이러한 실내 공기 오염의 위험성을 낮추는 방법으로 라돈뿐만이 아닌 전체적인 실내

공기 질을 위해 공기교환이 필요하다. 이는 실내 공기 질 상승뿐만 아니라 라돈저감 효율에는 좋지만 여름이나 겨울에는 에너지 손실을 초래한다[48].

따라서 에너지 효율적인 측면에서 건축자재가 주된 라돈 발생원일 경우 애초에 라돈의 발생이 많이 되는 건축자재의 사용을 피하는 것이 낫다.

하지만 모든 건축자재는 라돈을 포함하는 소량의 천연방사성물질을 함유한다. 암석과 토양에는 우라늄, 토륨의 붕괴생성물과 칼륨 등 방사성동위원소를 포함한 천연방사성핵종을 함유하며, 이러한 암석과 토양을 이용한 건축자재를 사용할 경우 방사선피폭을 묵과할 수 없다[48].

1996년 미국 EPA 연구보고서 ‘Technical Basis for a Candidate Building Materials Radium Standard’에 따르면 건축자재 콘크리트 내에 사용하는 골재 및 시멘트는 ^{226}Ra 함량 기준 370 Bq/kg, 콘크리트 자체는 180 Bq/kg (5 pCi/g)를 초과해서는 안 된다고 권고 한다[9].

한국 권고기준치인 4 pCi/L 또는 148 Bq/m³의 라돈농도가 일정하게 지속적으로 유지되는 실내공간에서 평생 동안 생활하는 흡연자 1000명중에서 약 62명(6.2%)이 폐암의 위험이 있다고 하며, 라돈에 의한 폐암 발생확률은 우리가 살아가는 동안 얼마나 많은 라돈을 호흡했느냐에 관계되므로 우리의 주거환경에서 라돈의 농도를 가능하면 낮추는 노력을 해야 한다[10].

라돈가스는 국제암연구기관(IARC)에서 1988년 발암물질로 분류하였으며, 전 세계 폐암의 3 ~ 14%가 라돈에 기인한다고 알려져 있으며, 세계보건기구(World Health Organization: WHO)는 라돈에 의한 폐암 위험성을 1 Bq/m³ 당 3 ~ 6 × 10⁻⁵(3 ~ 6명/10만 명)으로 추정하고 있다[11]. 이러한 라돈은 국민연간피폭선량의 절반 이상을 차지하므로 충분한 국민적 관심이 있어야 한다.

2016년 12월 시행예정인 실내공기질관리법에 따르면 실내라돈조사 및 조사자료를 바탕으로 라돈지도작성, 라돈으로 인하여 건강피해가 우려 될 경우 라돈관리계획을 수립하고, 라돈농도가 높은 건물에 대하여 저감 공법의 사용 등을 권고 한다.

하지만 이러한 관리는 기존에 라돈유역지역으로 분류될 가능성이 높은 지역인 평창, 봉화, 울진, 단양 지역 등 일부지역에 대하여 우선 시행될 것으로 보인다. 그러나 이 지역은 인구 밀집도 측면에서 낮은 수준을 보이고 있으며, 또한 기존 라돈에 대한 연구는 서울특별시 및 대전광역시에 집중되어 있어 다른 대도시에 대한 라돈의 조사나 측정이 광범위적으로 이루어진 적이 없으므로 특정 광역시에 대한 환경시료 분석을 통한 라돈 분포특성 및 영향평가 방법론 연구하고자 한다.

이러한 라돈에 대한 체계적이고 기반적 조사연구를 위해 지질에서 발산되는 라돈, 음용수로 사용되는 지하수의 라돈, 가정 내 라돈 및 건축자재 중 시멘트와 석고텍스에 포함된 실내 라돈농도 기여 분을 통한 라돈농도측정을 바탕으로 특정 광역시에 대한 라돈 위험도 지도를 작성하여 하나의 예측 영향 평가 인자로 사용하고자 한다.

제 2 장 본 론

제 1 절 개 요

1. 라돈의 특성

라돈은 지각의 암석이나 토양 중 천연적으로 존재하는 우라늄(^{238}U)과 토륨(^{232}Th)이 몇 단계 방사성 붕괴를 거대한 후 생성되는 불활성 기체이며 색이 없고, 맛이 없으며, 냄새가 나지 않은 방사성 가스로서 가장 무거운 기체 중 하나이다[12]. 공기나 천연수 속에도 적은 양이 함유되어 있으며 우라늄 광물 속에 흡착되어 존재하며 광천·온천·지하수 등에 용해되어 있다[12]. 라돈은 비활성 기체로 화학적 반응성이 없으나 전기 음성도가 큰 불소나 염소와 반응해 라돈 플루오라이드(RnF_2)와 같은 화합물을 생성하며, 물에 $230\text{ cm}^3/\text{L}(20^\circ\text{C})$ 녹고 유기용매에 더 잘 녹는다[12]. 또한 먼지나 미립자에 잘 달라붙어 떠돌아다니게 되며 우리가 호흡을 하면 호흡기를 통하여 폐에 들어가 호흡기계 피폭을 일으키며, 라돈이 광산이나 지하같이 밀폐된 공간에 축적되어 있을 경우 폐암을 유발시킨다는 보고가 있다[12].

동위원소로는 천연 동위원소 ^{219}Rn (악티논, An), ^{220}Rn (토론, Tn), ^{222}Rn 3종이 존재하는데, ^{219}Rn 와 ^{220}Rn 은 반감기가 짧아 공기 중으로 방출되는 양이 ^{222}Rn 에 견주어 매우 적기 때문에 보통 라돈이라고 하면 ^{222}Rn 를 가리키며, ^{222}Rn 는 동위원소 중에서 수명이 가장 길어 반감기가 3.825일이고 인공 동위원소로 20여 종이 발견되었으며, 라돈 원자는 알파 방사선을 내놓으면서 붕괴되어 방사성 원소인 플로늄의 원자가 된다[12].

2. 라돈의 모핵종 및 자핵종의 특성

천연 동위원소 중 두 종류의 라돈 동위원소가 큰 의미를 갖는데 천연 방사성 핵종의 우라늄 계열에서 나타나는 라듐-226(^{226}Ra)의 붕괴생성물인 라돈-222(^{222}Rn)와 토륨 계열에서 나타나는 ^{224}Ra 의 붕괴생성물인 라돈-220(^{220}Rn)이다[49]. 이들 근원에 따라 이 두 동위원소를 통상 라돈과 토론으로 부른다. 라돈은 불활성 기체이며 두 동위원소 모두 고체상의 원소로 붕괴하는데 이 붕괴생성물 원자들은 전하를 띠기 때문에 공기 중

에 존재하는 응축핵이나 먼지 또는 물체의 표면에 부착된다[49].

Table 1. Decay characteristics of the short-lived daughter nuclides with Rn222[13]

Radio nuclides	Half-life	Main radiation energy and release rate(y)					
		α -ray		β -ray		γ -ray	
		Energy (MeV)	y(%)	Max-Energy(MeV)	y(%)	Energy (MeV)	y(%)
^{222}Rn	3.824 d	5.49	100	-	-	0.51	0.07
^{218}Po	3.05 min	6.00	100	0.33	0.1	-	-
^{214}Pb	26.8 min		-	1.02	6	0.35	37
				0.70	42	0.30	19
				0.65	48	0.24	8
^{214}Bi	19.9 min		-	3.27	18	0.61	46
				1.54	18	1.77	16
				1.51	18	1.12	15
^{214}Po	164 μs	7.69	100	-	-	-	-

^{222}Rn 는 반감기 3.82 일로 알파입자를 내면서 붕괴하여 폴로늄-218(^{218}Po)로 되며, ^{218}Po 는 반감기 3.05분인 납-214(^{214}Pb)로 붕괴하고, ^{214}Pb 는 안정된 ^{206}Pb 까지 붕괴해 내려간다. 이들 중 ^{222}Rn 가 주된 피폭원으로 작용하며 Po-210 까지 붕괴하는 동안 1.0 Bq 당 34,620 MeV의 잠재적 알파에너지를 방출한다고 알려져 있으며, 일반적으로, 라돈 0.03 Bq/g 이 포함된 토양은 1000 ~ 2000 Bq/m³ 의 라돈을 매일 대기 중으로 방출한다 [14]. 이러한 라돈의 자핵종들은 호흡 시 폐에 누적 침적되어 폐조직에 손상을 주기도 한다. 이와 같이 폐조직이 지속적으로 손상되면 폐암이 유발될 수 있는 것이다.

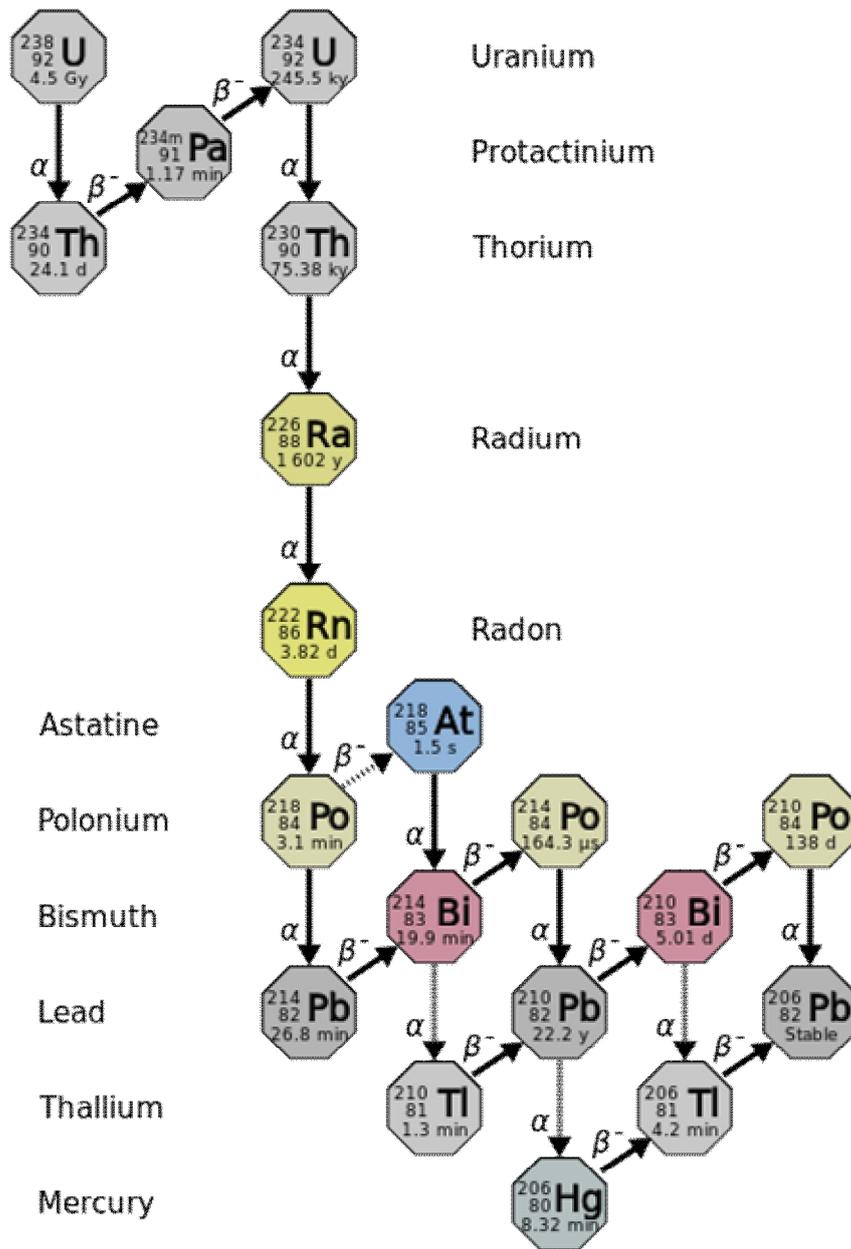


Figure 1. Uranium (U 238) decay map[15].

^{220}Rn (토론)에 의해 제기되는 문제는 ^{222}Rn (라돈)의 문제에 비해 범위가 좁고 다루기 용이하며, 토론에 대한 방호는 그 붕괴생성물인 반감기 10.6 시간의 ^{212}Pb 흡입을 제어

하는 것으로 충분하다[49]. 그리고 토론의 경우 반감기가 전반적으로 짧기 때문에 주로 토양 내에서 거주지로 침입해 들어오기는 힘들며 대부분 토론에 의한 피폭은 건축 자재로 한정지어도 된다.

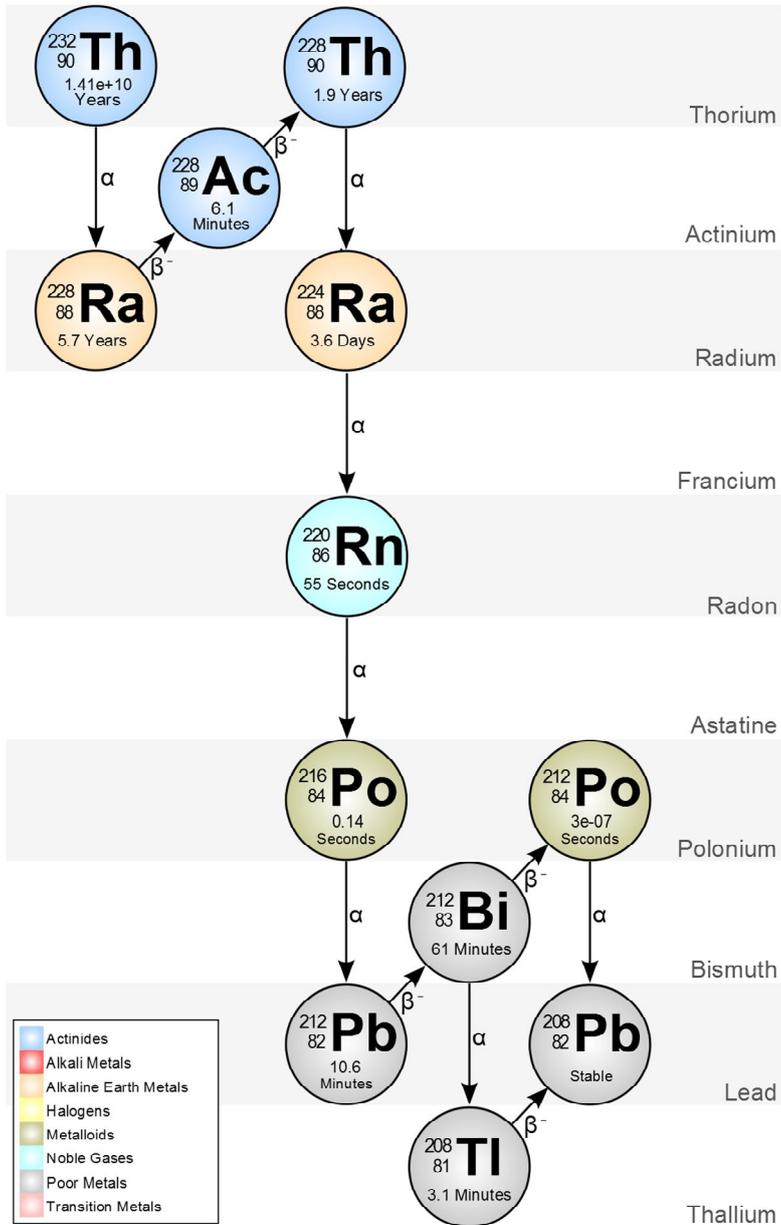


Figure 2. Thorium ($\text{Th } 232$) decay map[15].

3. 라돈의 위해성

우리나라 국민은 연간 약 3.73 mSv의 피폭선량을 받는다. 이 중 자신의 신체에서나 대지, 우주선에서 받는 피폭선량이 1.1 mSv 정도이며 그 외에 라돈과 그 자핵종에 의한 피폭선량이 2 mSv 정도며, 라돈피폭선량의 79%가 실내에서 라돈흡입에 의한 것으로 보고된다[2]. 라돈과 딸핵종은 호흡 시 호흡기 속으로 들어가 대부분 날숨에 의해 다시 나오지만 일부는 호흡기계에 잔존하고, 흡착되어 붕괴하며, 이 과정에서 조직에 지속적인 손상으로 인한 폐암 발생을 일으킬 수 있는 것이다[46]. 국제암연구기관(IARC)에서는 이러한 위험 때문에 1988년에 라돈을 인체 발암물질로 분류하였으며, 전 세계 폐암의 3 ~ 14%가 라돈에 기인한다고 알려져 있다[11].

미국 EPA 보고서에 따르면 미국 내 라돈에 의한 사망은 약 21,000명 수준으로 음주 운전 사망자보다 더 많으며 대기오염에 의한 사망자의 10배 수준이다[16]. 더군다나 오늘날 사회에서는 주간에는 직장이라는 실내공간과 야간에는 가정이라는 실내공간에서 우리 생활 대부분이 이루어짐을 감안할 때 라돈의 위험은 더욱 증가될 것으로 보인다[46]. EPA에 'A Citizen's Guide to Radon' 에 따르면 미국 규제치 4 pCi(148 Bq/m³)의 농도에서 지속적 생활시 흡연자의 경우 100명 중 6.2명의 폐암 위험성을 경고하고 있으며, 이는 자동차 사고의 5배이며 평균 실외 라돈농도 노출 시 0.3명의 20배 정도이다[17][18].

라돈 붕괴 시 발생하는 알파선의 신체 내 비정은 40 ~ 70 μm 정도만 통과할 수 있으며 라돈 붕괴산물은 화학적 활성이 매우 강하여 폐 내부나 폐 조직에 머무는 동안 폐의 상피세포나 미세먼지들에 쉽게 부착된 후 붕괴를 이어가게 된다[22].

미국 EPA에서는 실내 라돈농도 권고치를 0.148 Bq/L(4 pCi/L)를 권고하고 있으며 이 농도치는 일생동안 피폭 시 폐암으로 사망할 위험율이 약 1 ~ 2%가 증가하는 수치이다[22].

라돈에 의한 인체 영향은 장기피폭에 의한 폐암 발생으로 나타나며, 이는 3가지 요인에 주로 좌우된다[33]. 즉, 라돈농도가 높고 노출기간이 길며, 흡연습관이 있는 경우에는 폐암발생률이 증가한다[33]. 2014년 폐암사망률은 10만 명당 34.4명으로 전체 인구 5,132만 명으로 보면 한해 17,654명이 폐암으로 사망하는 것으로 계산되며 EPA자료인 10 ~ 15%로 계산 시 약 1,765 ~ 2,648명이 라돈에 의한 초과 폐암으로 사망하게 되는 것으로 볼 수 있다[17][19]. 이러한 실내 라돈으로 인한 초과 폐암사망에 따른

의료손실비용은 연간 1,789억 원이며, 통계적 인간생명가치로 환산한 값은 연간 1조 2,803억 원에 이르는 것으로 추정된다[20].

Table 2. Radon Risk if you[17]

Radon Level	If 1,000 people who smoked were exposed to this level over a lifetime...	The risk of cancer from radon exposure compares to...	WHAT TO DO: Stop Smoking and ...
20 pCi/L	About 260 people could get lung cancer	◀250 times the risk of drowning	Fix your home
10 pCi/L	About 150 people could get lung cancer	◀200 times the risk of dying in a home fire	Fix your home
8 pCi/L	About 120 people could get lung cancer	◀30 times the risk of dying in a fall	Fix your home
4 pCi/L	About 62 people could get lung cancer	◀5 times the risk of dying in a car crash	Fix your home
2 pCi/L	About 32 people could get lung cancer	◀6 times the risk of dying from poison	Consider fixing between 2 and 4 pCi/L
1.3 pCi/L	About 20 people could get lung cancer	(Average indoor radon level)	(Reducing radon levels below 2 pCi/L is difficult)
0.4 pCi/L		(Average outdoor radon level)	

Table 3. Radon Risk if you' ve never smoke[17]

Radon Level	If 1,000 people who smoked were exposed to this level over a lifetime...	The risk of cancer from radon exposure compares to...	WHAT TO DO:
20 pCi/L	About 36 people could get lung cancer	◀35 times the risk of drowning	Fix your home
10 pCi/L	About 18 people could get lung cancer	◀20 times the risk of dying in a home fire	Fix your home
8 pCi/L	About 15 people could get lung cancer	◀4 times the risk of dying in a fall	Fix your home
4 pCi/L	About 7 people could get lung cancer	◀the risk of dying in a car crash	Fix your home
2 pCi/L	About 4 people could get lung cancer	◀the risk of dying from poison	Consider fixing between 2 and 4 pCi/L
1.3 pCi/L	About 2 people could get lung cancer	(Average indoor radon level)	(Reducing radon levels below 2 pCi/L is difficult)
0.4 pCi/L		(Average outdoor radon level)	

가. 실내로의 라돈유입

실내에 존재하는 라돈가스는 Figure 4와 같이 크게 토양층의 균열을 통해서 직접적으로 들어오거나 건축자재인 콘크리트 블록이나 방바닥 물질 등에서 유입이 된다[13]. 이러한 라돈 이동은 이류(advection)와 실내공기의 라돈농도가 평행상태에 이루어질 때까지 확산하는 확산이동으로 나눌 수 있는데, 이류는 다시 압력차에 의해 이동하는 압력이동과 온도, 압력, 밀도차에 의한 이동인 대류이동으로 나눌 수 있다[13].

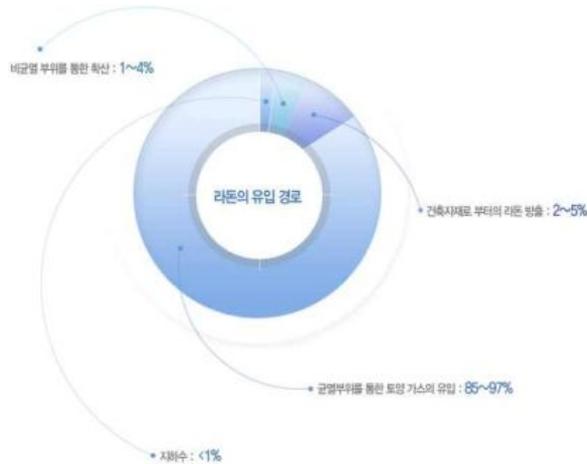


Figure 3. Radon funnel [10].

이러한 실내로의 라돈가스 유입경로를 세분하여 보면 Figure처럼 11가지의 경로로 요약할 수 있다.

나. 국내·외 라돈규제

대부분의 국가들이 실내 라돈은 피폭선량의 관점에서 연간유효선량 한도범위의 규제 기준을 설정하고 있다. ICRP에서는 연간 10 mSv이상 지속적으로 피폭하는 경우에는 주거시설 내 라돈저감을 위한 개선 대책이 정당화 될 수 있다고 하며, 조치준위는 자연 방사선원으로 받는 피폭선량보다 5 ~ 10배 정도의 크기에서 결정하는 것이 합리적이라고 하고 있다[43]. 이에 따르면 연간유효선량에 대한 조치준위의 선택은 건물 내 거주 시간이 연간 7000시간이고, 평형인자가 0.4로 가정할 때 3 ~ 10 mSv 의 선량에 상응하는 라돈농도 값은 약 200 ~ 600 Bq/m³ 이며, 이러한 기준을 가지고 국가별 특징에 따

라 규제기준을 운영하고 있다[5].

- A: 건물 하부 갈라진 틈
- B: 벽돌과 벽돌 사이
- C: 벽돌내의 기공
- D: 바닥과 벽의 이음매
- E: 건물에 직접 노출된 토양
- F: 우수 배관로
- G: 모르타르 이음매
- H: 접합이 느슨한 파이프
- I: 출입문의 틈새
- J: 건축 자재
- K: 지하수의 이용

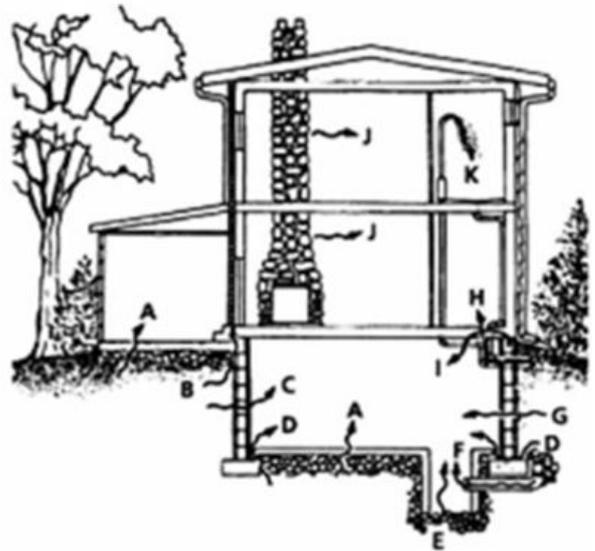


Figure 4. Indoor radon enters route[21].

국내에서 라돈에 대한 규제는 1989년 “지하 공간 환경기준 권고치 설정”에서 4 pCi (148 Bq/m³)로 권고하는 것이 처음으로 볼 수 있다. 2016년 12월 23일 시행예정인 실내공기질관리법에 의하여 실내공기중라돈농도에 대하여 권고에서 규제로 바뀌게 되었다. 또한 실내라돈농도 조사 및 라돈지도 작성, 저감화 대책 등 라돈에 대한 체계적인 관리를 수행할수 있는 기반을 마련하고자 하고 있다.

미국 EPA는 1988년에 Indoor Radon Abatement Act of 1988으로 라돈저감기준을 마련했으며, 매년 1월을 National Radon Action Month로 지정해 라돈노출에 의한 건강위해성에 대한 인식을 고취시키고 라돈조사/저감/방호건축기술을 향상시키는 노력을 기울이고 있다[22]. 그리고 전국적인 라돈실태조사를 하여 라돈분포지도를 만들어 공개함으로써 라돈의 위해성을 강조하고 있으며, "A Citizen's Guide to Radon", "Home Buyer's and Seller's Guide to Radon", "Consumer's Guide to Radon Reduction", "Building Radon Out" 등 여러 자료를 통해 가정에서의 라돈측정과 조치사항, 라돈레벨 저감시스템 설계와 설치에 대한 기준, 라돈을 방호하는 집을 짓는 법, 주택의 구매 및 판매시 라돈측정 규정 등의 구체적인 정보를 제공하고 있다[22].

유럽국가들의 경우 노르웨이, 핀란드 등 많은 나라에서 세계보건기구(WHO)에서 1987

년에 제정한 “Air Quality Guideline for Europe” 에 근거하여 기준을 설정하고 있다 [50]. 특히 세계보건기구(WHO)는 2005년 국제라돈프로젝트(International Radon Project)를 발족시켜 Risk Communication 뿐만 아니라, 라돈의 위험성 정책 저감과 방지에 대한 정보를 수집하고 분석하고 있다[50].

다음의 Table 4는 세계 각국의 실내 라돈 규제치를 나타내고 있다.

Table 4. International regulation level of radon[23]

Country	Regulation level	Country	Regulation level
Korea	148 Bq/m ³ (4 pCi)	Germany	250 Bq/m ³ (6.8 pCi)
U.S.A	148 Bq/m ³ (4 pCi)	Hongkong	200 Bq/m ³ (5.4 pCi)
Canada	800 Bq/m ³ (22 pCi)	Czech	200 Bq/m ³ (5.4 pCi)
U.K	200 Bq/m ³ (5.4 pCi)	Norway	200 Bq/m ³ (5.4 pCi)
Finland	400 Bq/m ³ (10.8 pCi)	Poland	400 Bq/m ³ (10.8 pCi)
Sweden	400 Bq/m ³ (10.8 pCi)	Lithuania	100 Bq/m ³ (2.7 pCi)
Ireland	200 Bq/m ³ (5.4 pCi)	WHO	100 Bq/m ³ (2.7 pCi)
Luxembourg	200 Bq/m ³ (5.4 pCi)	EU	400 Bq/m ³ (10.8 pCi)

음용수 중의 라돈과 관련하여 미국의 경우 EPA 주도하에 MCL(Maximum Contaminant Level) 수치(300 pCi/L)와, 더 높은 수치(4000 pCi/L)의 AMCL(Alternative MCL)을 운영하고 있으며, 지하수를 가옥내 제공하는 모든 지역의 수처리 시스템은 음용수중의 라돈에 대해 제한된 규정을 따르도록 하고 있다. 지역의 수처리시스템을 준수하는 경우나 실내공기 중의 라돈 위험을 알리는 MMM프로그램을 이용하는 경우 AMCL기준을 따르도록 되어 있으며, 두 프로그램을 모두 준수하지 않는 경우는 MCL을 준수하도록 하고 있다[22].

제 2 절 지하수 라돈농도 측정

1. 측정 장비 및 방법

가. 측정 장비

일반적으로 사용되는 라돈검출기는 작동원리 및 방식에 따라 크게 능동형(active detector)과 수동형(passive detector)로 구분된다. 수동형 라돈검출기는 비교적 사용이 간편하고, 검출기의 가격이 저렴하여 경제적인 장점이 있다. 그러나 장기간 측정이 필요하여 신속한 측정값을 얻기 어려우며, 온·습도 등 외부환경 영향에 의해 결과의 신뢰성이 저하되는 단점이 있다[10][40]. 능동형 라돈 검출기는 라돈 및 자핵종의 농도를 측정하거나 시변화 등을 확인할 수 있고, 신속한 측정 및 연속적인 라돈농도 변화 자료를 얻을 수 있기 때문에 능동형 검출기인 SARAD사 RTM1688-2 라돈 모니터링 장비를 사용한다.

① 라돈모니터링장비(SARAD사 RTM-1688-2)의 용도[24]

- 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

② 라돈모니터링장비(SARAD사 RTM-1688-2)의 특징[24]

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



Figure 5. SARAD사 RTM1688-2.

RTM 1688-2은 실리콘표면장벽형식의 이동식 연속라돈모니터 장치로서 라돈 과 토론을 동시 측정이 가능한 장비이다. 130 ml 내부용적의 측정 Chamber 안으로 0.25 l/min 유속으로 공기를 흡입하여 측정하는 방식으로, 두 단계 필터시스템에 의해서 라돈과 토론의 딸핵종은 통과되지 않으며, ^{222}Rn 와 ^{220}Rn 만 필터를 통과하여 챔버 내부로 들어오게 된다(Figure 6, Figure 7)[24][25][26][27].

내부는 150 mm² Active area 음극의 실리콘 표면장벽 검출기와 양극의 Chamber 벽면으로 이루어져 있으며, 약 1400 V의 전위차로 되어 있다[24][25][26][27].

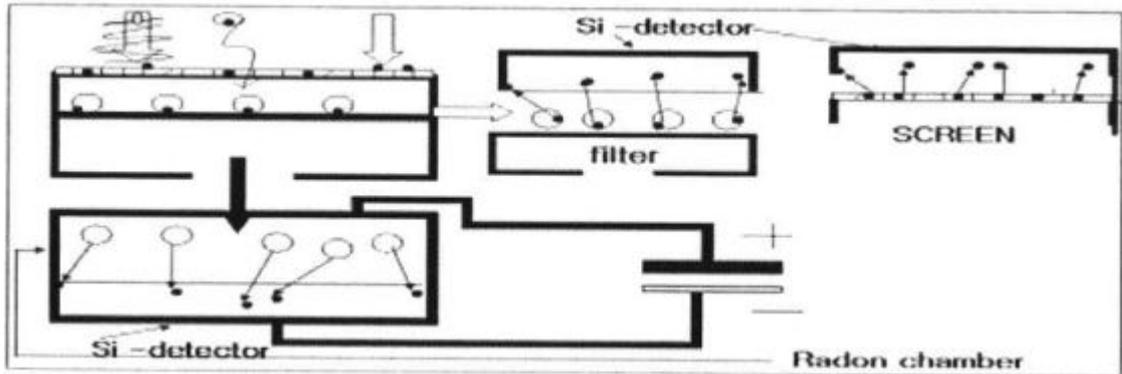


Figure 6. RTM1688 measurement system schematic.

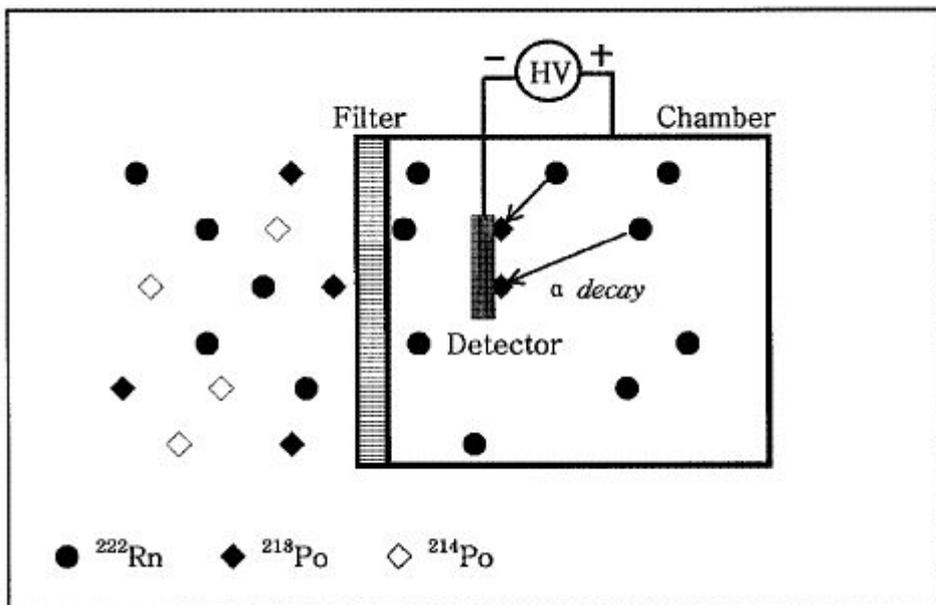


Figure 7. Radon chamber operation.

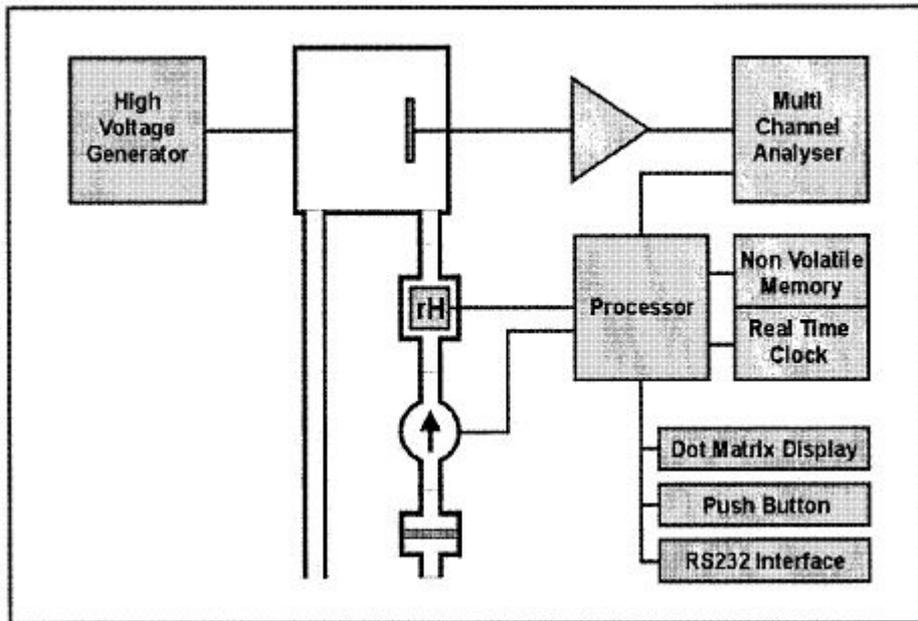


Figure 8. RTM1688 Block diagram.

작동원리로는 계측기 내부로 흡입된 공기 중에 존재하는 ^{222}Rn 와 ^{220}Rn 은 알파붕괴에 의해 이온성 물질인 ^{218}Po 과 ^{216}Po 로 붕괴하며, 이들은 높은 전위차로 인해 검출기 표면에 포집되게 된다[46]. 그러나 ^{218}Po 의 검출효율은 통계적으로 약 50% 정도 측정이 이루어지며, ^{218}Po 과 ^{216}Po 의 Count수를 파악하여 흡입된 공기 안에 포함된 ^{222}Rn 와 ^{220}Rn 의 농도를 측정하며, 두 가지 요소에 의한 Count의 증가는 라돈측정농도에 ^{214}Po 를 포함시킬 수 있으며, 계측기에 포집된 ^{218}Po 의 붕괴계열에서 ^{214}Po 가 생성되면, ^{218}Po 카운트에 의해 ^{214}Po 카운트를 측정할 수 있지만 핵종 붕괴에 따른 딸핵종 생성시간이 오래 걸린다는 단점이 있다[24][25][26][27].

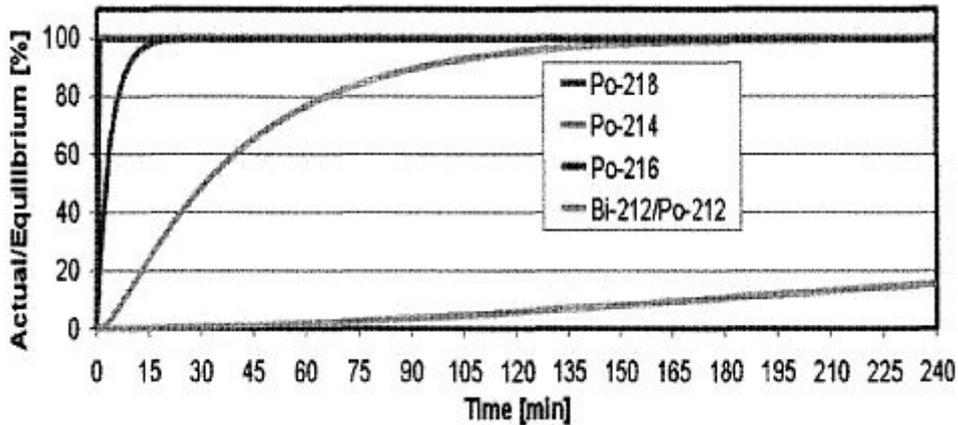


Figure 9 Radon chamber step response.

Total Measurement System Dose는 공기 중 라돈 농도를 검출하기 위한 고정효율을 다음의 식과 같이 나타낸다[24].

$$E = \frac{cts(counts)}{min \times kBq/m^3}$$

E(efficiency) : 절대습도에 따른 검출기의 측정 챔버안에서의 효율

²²²Rn와 ²²⁰Rn 농도는 다음과 같은 식에 의해서 계산된다[24].

²²²Rn와 ²²⁰Rn의 농도

$$C = \frac{N}{E \times T}$$

T: Interval time
N: Registered ²¹⁶Po or ²¹⁸⁽²¹⁴⁾Po count during the interval time

또 다른 붕괴산물로부터 생성된 핵종 ²¹⁶Po과 ²¹⁸⁽²¹⁴⁾Po의 각각의 계측 수는 5 Energy Windows(ROI)가 Spectroscopy System에 의해서 측정되며, 각각의 ROI에 의한 알파핵종은 다음과 같다[24].

ROI 1 : long-lived alpha emitters(e. g. ²¹⁰Po)

ROI 2 : ²¹⁸Po or ²¹²Bi

ROI 3 : ²¹⁶Po

ROI 4 : ²¹⁴Po

ROI 5 : ²¹²Po

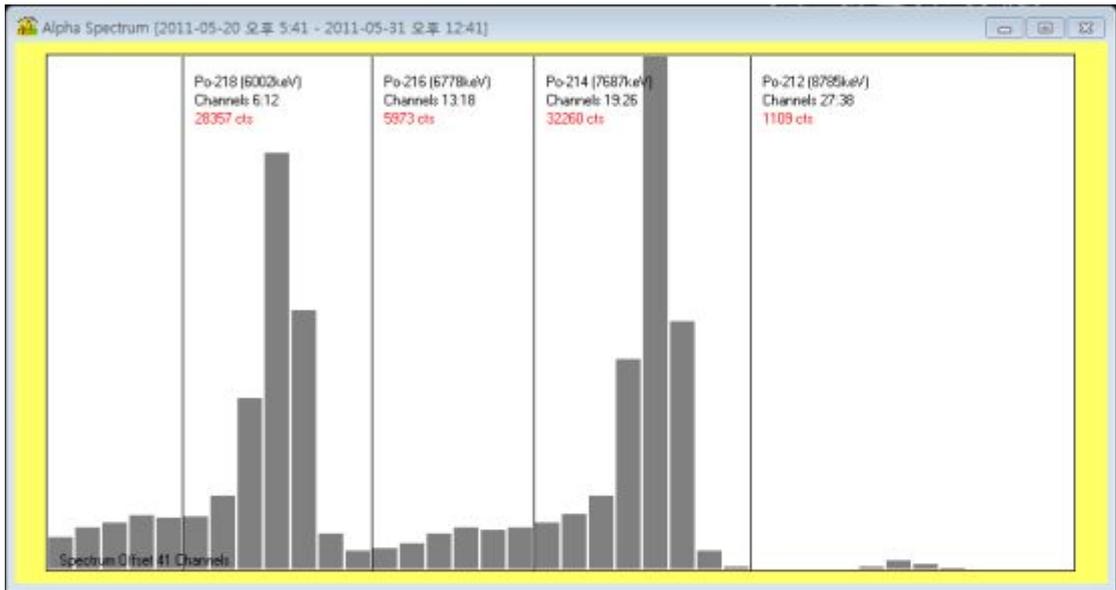


Figure 10. Alpha Spectrum.

이를 이용하여 RTM1688-2의 데이터 출력 수식은 다음과 같다[24].

Radon(Slow) : $1000 \cdot (R011 + R013) / (\text{Time} \cdot \text{Sensitivity})$ (R011 : ^{218}Rn R013: ^{214}Rn)

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, ^{222}Rn 와 ^{220}Rn 의 counts는 Detector에 부착되지 않기 때문에 매우 낮게 측정이 된다. 즉, Long-lived Alpha Daughters(^{210}Po)는 필터를 통과되지 않으며 Spectrum에서 주도적인 영향을 나타나지 않는다.

핵종간의 Interval time과 통계적 Error는 다음과 같은 식에 의해서 계산되며, RTM1688의 민감도를 분석을 위해 Calibration을 하여야 한다[24][25][26][27].

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

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)

측정프로그램으로는 RADON VISION4를 사용하여 측정을 하였고 계측기 세팅으로는 Pump Mode는 Continuous, Radon Mode는 Fast Mode를 사용 하였으며, 10분 계측에 따른 신뢰구간을 95%로 사용하였다. 이에 따른 검출기의 검출한도는 다음과 같다[24].

$$\begin{aligned}
 C &= N / T(*S) = 3 \text{ cts} / (10 \text{ min} * 8 \text{ cts/min}*kBq/m^3) \\
 &= 0.0375 \text{ kBq/m}^3 = 37.5 \text{ Bq/m}^3
 \end{aligned}$$

나. 검출 방법

라돈의 반감기는 3.8일로 짧기 때문에 시료 채취일자와 측정시간을 고려하여 시료 채취 후 빠른 시간안에 검출이 이루어질 수 있도록 하였으며, 그 방법으로는 측정용기 내부에 공기에 의한 버블을 발생시켜 지하수에 포함되어 있는 라돈을 수중에서 제거시킨 뒤 RTM1688-2에 내장된 air pump를 이용하여 장비내부의 air chamber로 이송 및 포집하여 라돈 자핵종을 검출하는 방법을 이용하였다(Figure 11).

취수병 및 버블러 내부 용적 및 유로, air chamber내부 공간에서의 충분한 평형 상태 유지를 위하여 장비 가동 후 30분간 안정화 및 내부용적으로 라돈기체의 build up 시간을 주었고, 그 후 10분 간격으로 6번 측정 후 평균농도를 이용하였다(Figure 12). 또한, 라돈의 농도는 온도와 음의 상관성을 가지고 있기 때문에 기록한 평균농도는 온도와 유로의 볼륨에 따라 자체 프로그램을 이용하여 보정하였다(Figure 13). 보정된 라돈농도는 라돈의 붕괴상수를 고려하여 취수한 지하수 원수의 이론적인 농도를 구하였다.

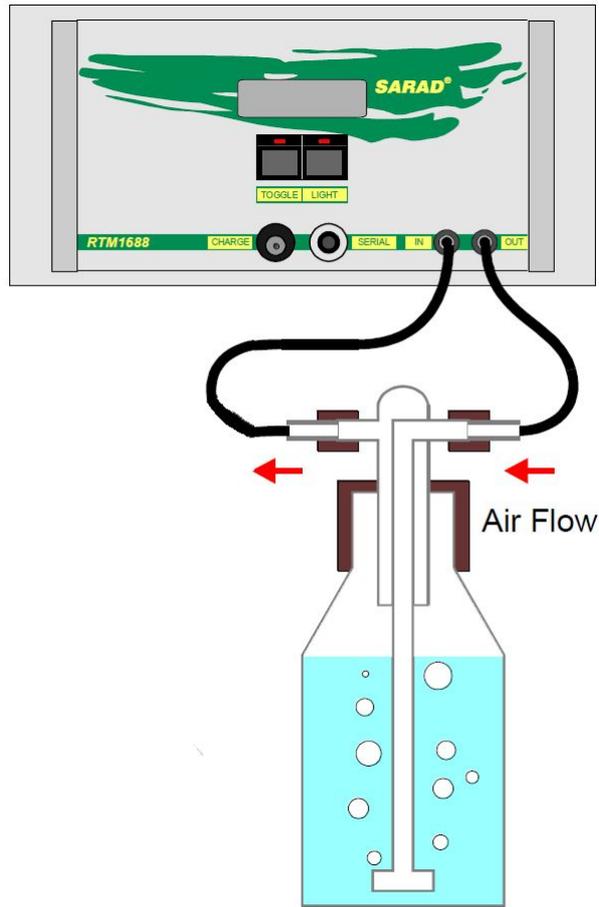


Figure 11. Sample bubbling process using RTM1688.



Figure 12. Radon Vision Program.

SARAD Radon in Water Calculator

Water Sampling Configuration

Description

RTM1688 (internal volume 130 ml)
Bubbler 100 ml

SAVE

OPEN

Water Volume Air Volume Correction

500 ml 230 ml 1

Water Sampling Conditions

Water Temperature Conversion Factor

23.5 °C **0.691**

Displayed Radon Concentration

64510 Bq/m³

Radon in Water Concentration

44.592 Bq/L

CALCULATE

Figure 13. Correction calculation program.

다. 용기 적절성 및 누설검사

지하수 내 라돈농도 실험을 위해서 취수한 지하수를 실험실로 이송하여 측정하는 방식을 선택하였다. 이 방식에서 이동 중 취수용기 병목 부위를 통한 라돈가스 누설 가능성이 존재할 수 있다. 그래서 관련 문제를 제거하기 위해 일반적인 수질실험용으로 사용되는 연질의 무균 채수병 사용 시 이송 중 진동이나 충격으로 수중라돈이 쉽게 용출될 수 있어 메디아병을 대신 사용하였고 이송시간에 따른 누설이나 자연감쇄 관련 확인을 위한 적절성 평가를 수행하였다.

평가를 위하여 동일 조건하에 지하수 6병을 취수하여 일정시간을 경과 시킨 후 측정을 실시하였으며 측정까지 냉암소에 보관 하였다.

실험 결과 7.2시간 경과 시 3% 오차가 발생하였으며 31.3시간 경과 시에 최대 10%의 오차가 발생을 확인할 수 있었다(Table 5)(Figure 14). 이를 통해 볼 때 취수원에서 실험실로 이동에서 발생하는 시간적 경과에 따른 오차는 없을 것으로 판단되며 이후 실행된 실험에서도 6시간에 2 ~ 3% 수준의 오차만 발생되어 이송 중 누출에 따른 보정은 반영하지 않았다.

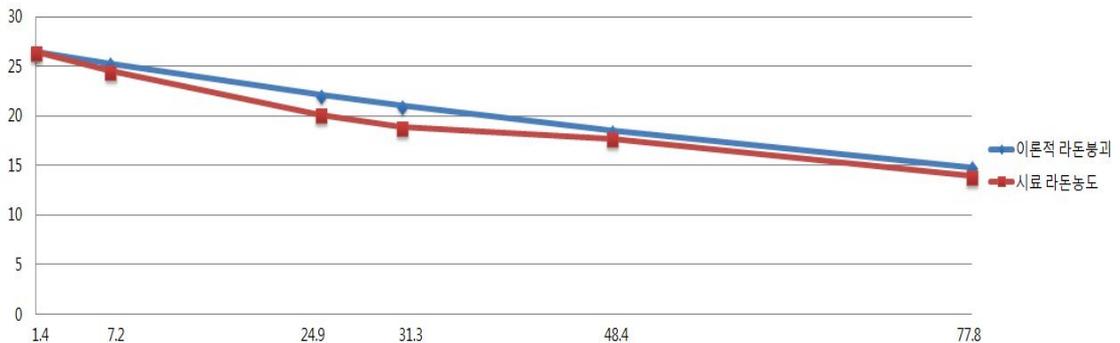


Figure 14. Hourly measurements radon concentrations in the sample.

Table 5. Hourly measurements radon concentrations samples

After sampling the elapsed time(hr)	Measurement (Bq/L)	Natural Attenuation in accordance with the actual survey (Bq/L)	Measurement error
1.4	26.42	-	-
7.2	24.47	25.29	3%
24.9	20.13	22.12	9%
31.3	18.87	21.07	10%
48.4	17.72	18.52	4%
77.8	13.94	14.82	6%

라. 취수시점 평가

지하수 유량 및 수위 그리고 성분은 지하수 사용량, 강우량등에 영향을 받을 것으로 생각되며, 이러한 지하수 성분변화는 지하수에 용해되어 있는 라돈농도에도 변화를 미칠 것으로 보이며, 결론적으로 동일 취수지점이라 하더라도 환경요건 변화에 따라 지하수 내 용해되어 있는 라돈농도는 다를 것으로 예측된다.

이러한 취수 시점에 따른 지하수 내 라돈농도 변화량을 확인하기 위하여 2월부터 8월까지 6개월 동안 매주 1회씩 동일지점에서 취수를 통한 변화를 확인하였다.

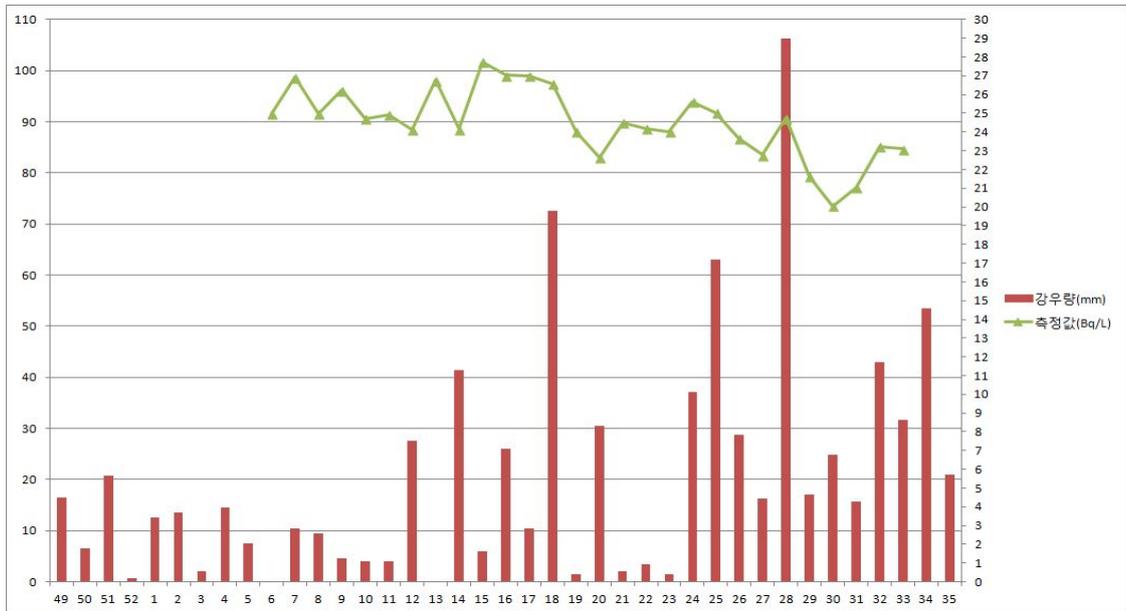


Figure 15. Rainfall and underground water containing radon concentrations in comparison.

실험 결과 15주차에 최대 농도인 27.72 Bq/L 30주차에 최저 농도인 20.04 Bq/L을 보였으며, 최대 농도 대비 최저 농도는 28%의 낮은 수준을 보인다.

지하수 내 라돈농도의 변화는 일반적으로 갈수기에는 높고 풍수기에는 낮은 경향을 보이고 있으며, 실험지점에서는 40mm이상 강우 시 2주 후 지하수 라돈농도에 변화가 발생한 점을 일부 확인 할 수 있었지만 SPSS ver.22을 통하여 시계열 분석결과 유의하지는 않았다. 하지만 갈수기와 장마기간에 지하수 라돈 농도의 차이가 보이는 점을 보아 향후 지하수에 포함된 라돈 관련 실험 수행 시 강우량 및 계절에 따른 보정 계수 등 관련 실험 및 취수시점에 대한 고려가 필요할 것으로 보인다.

마. 취수지점 선정 및 취수

지하수 취수를 위한 취수시점은 강우량의 영향을 고려하여 갈수기인 4,5월에 취수를 시행하였다. 광주광역시 내에 분포하는 지하수공 중 일부를 선정하여 채취하였고, 취수한 지하수가 대수층의 지하수를 나타낼 수 있도록 15 ~ 30분간의 양수를 거쳐서 수온과 T.S.D, 전기전도도 수치가 안정을 이룬 후 취수용기에 기포 및 빈 공간이 없도록 가득 채워 취수하였다. 취수 후 실험실시 전 까지 냉암소에 보관하였다.

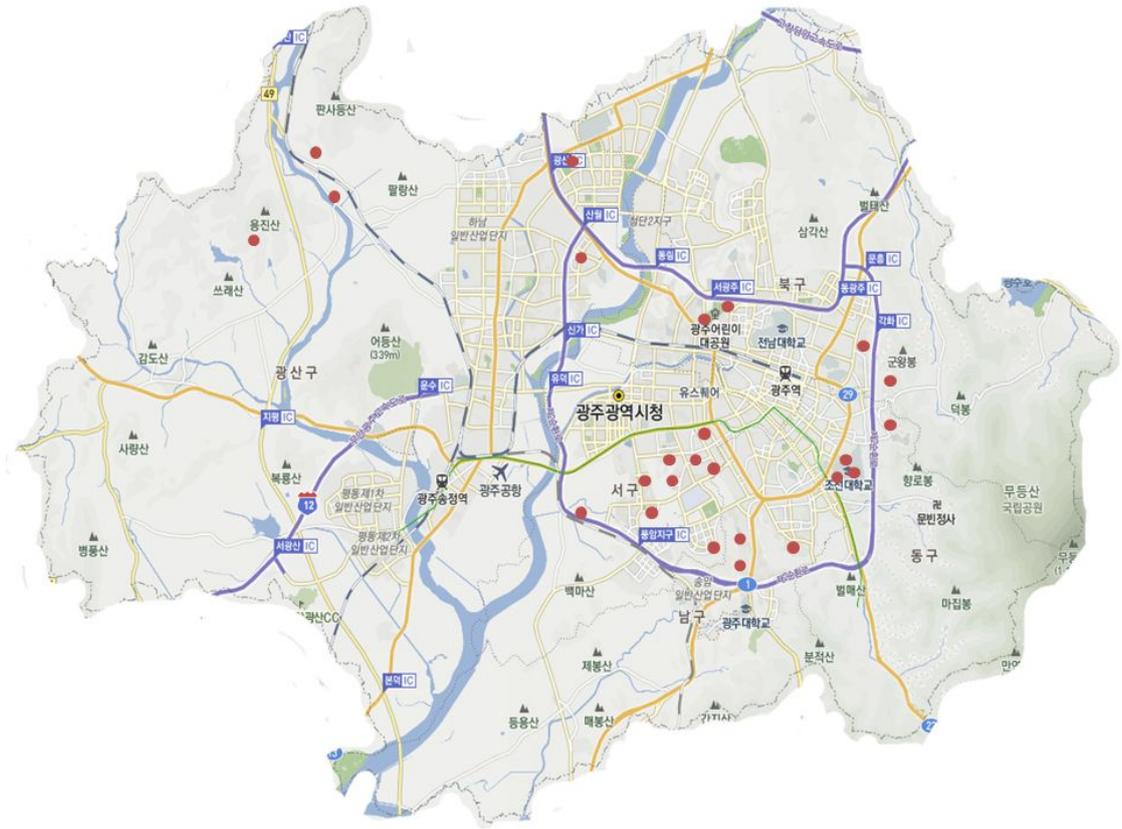


Figure 16. Gwangju underground water intake point.

2. 라돈농도 실험결과

측정된 라돈농도는 취수시점과 측정시점 간 차이를 보정하기 위하여 원수 취수시점에 대한 값을 붕괴상수를 통하여 이론적으로 계산하면 다음 Table 6과 같이 측정값과 보정값이 나타난다.

최고 측정지점으로는 W-07에서 119.16 Bq/L가 검출되었으며, W-23이 3.51 Bq/L로 최저 측정 지점이었다.

미국 환경청은 음용수의 라돈 기준농도(Multimedia Mitigation programs 미 참가)를 11.1 Bq/L로 기준하고 있으며, 세계보건기구는 100 Bq/L를 기준으로 한다. 광주광역시 내 취수한 지하수에 포함된 라돈 농도의 측정지점 대부분이 미 기준치를 초과 하였다. 이 중에서 최고 11배를 초과 하는 지정도 존재하였으며, 1개 지점은 WHO 기준을 초과 하였다.

측정값을 바탕으로 GIS 애플리케이션을 이용하여 측정지역 및 인근의 농도를 추정적으로 확인하고자 보간법을 이용한 수치추정분석을 통해 지도에 모식화하였다(Figure 17).

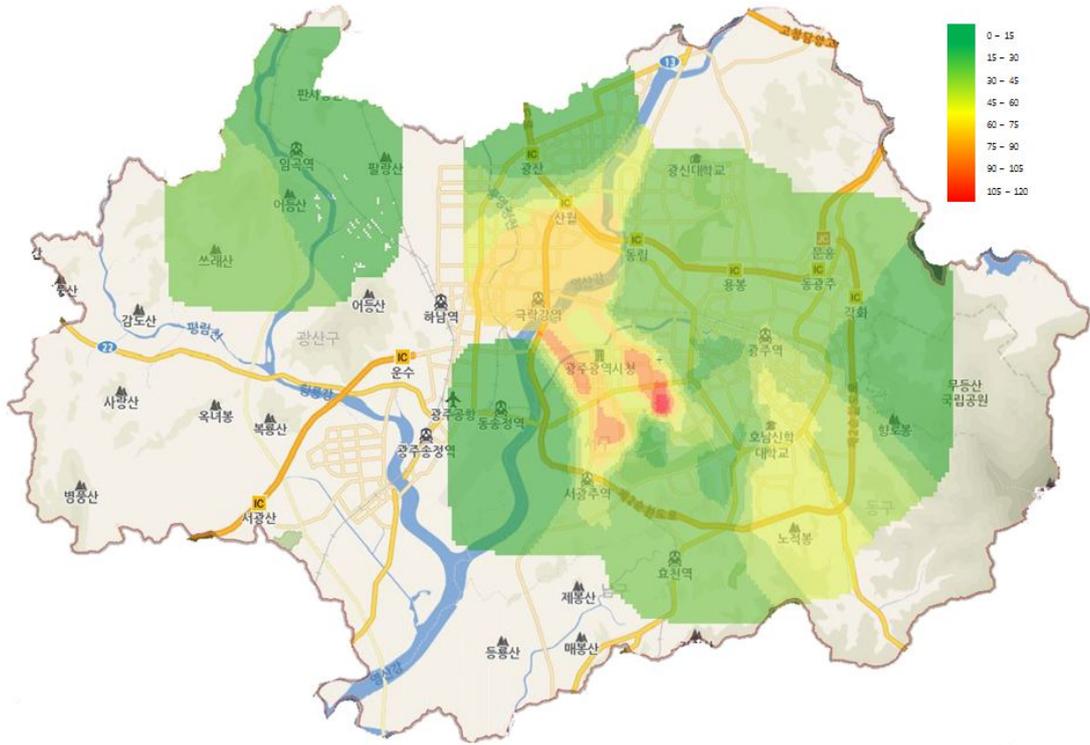


Figure 17. Analysis schematic estimate underground water radon levels[48].

Table 6. Radon concentrations in underground water sources

Water sources	Measurements (Bq/L)	Elapsed time (min)	Theoretical initial radon concentration (Bq/L)
W-01	48.65	130	49.46
W-02	32.46	54	32.73
W-03	42.38	54	42.67
W-04	11.79	62	11.88
W-05	26.32	60	26.52
W-06	37.78	75	38.60
W-07	119.16	170	121.76
W-08	3.93	622	4.25
W-09	82.11	97	83.12
W-10	39.01	1133	45.03
W-11	11.46	390	12.04
W-12	12.55	335	13.10
W-13	11.23	350	11.73
W-14	4.17	260	4.308
W-15	47.64	59	48.00
W-16	16.37	115	16.61
W-17	20.17	94	20.41
W-18	8.86	103	8.98
W-19	26.09	520	27.87
W-20	26.42	82	26.70
W-21	57.16	640	62.23
W-22	11.45	390	12.02
W-23	3.53	69	3.55
W-24	27.24	150	27.76
W-25	3.51	197	3.61

3. 지질과의 상관관계 조사

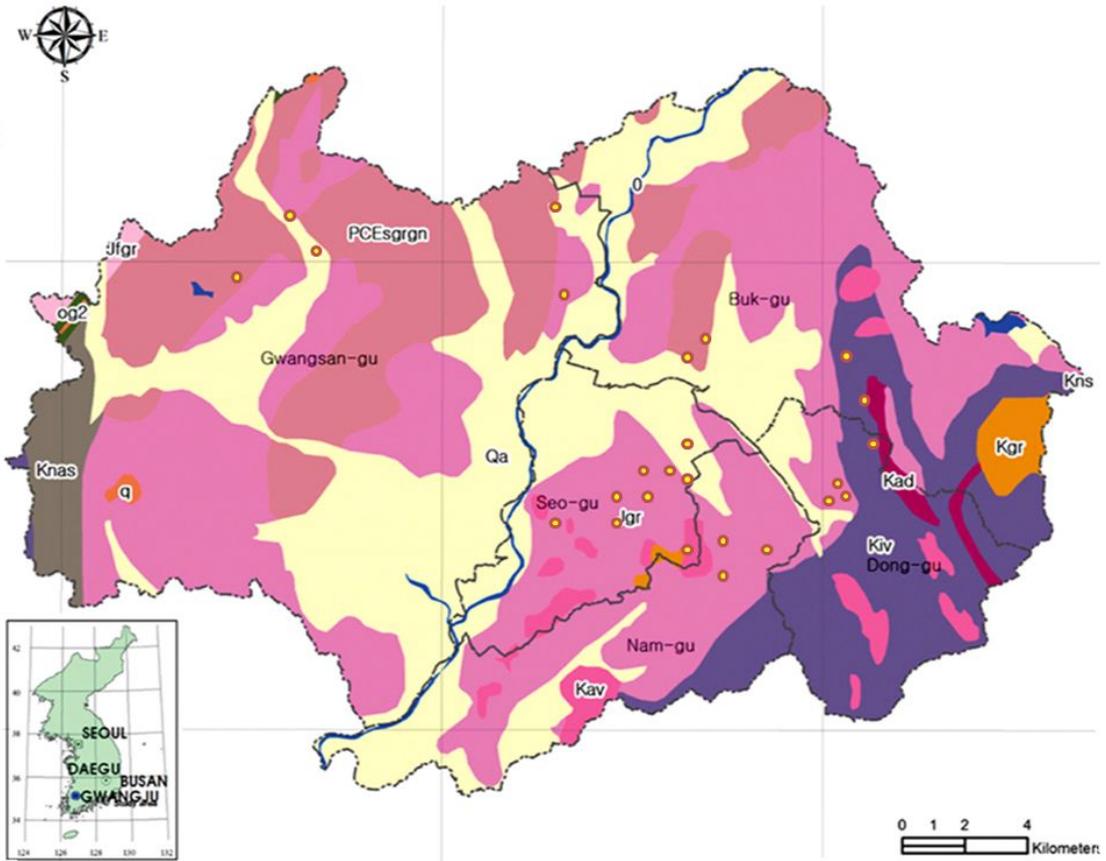


Figure 18. Underground water intake point and geologic maps[28].

지하수 중 라돈의 농도는 지하수 관정이 관통한 대수층의 영향을 받을 것이며 대수층의 정보 확인을 위하여 지질도를 살펴볼 필요가 있다. 일반적으로 지질은 크게 결정질암과 퇴적암으로 구분할 수 있는데 결정질암은 다시 화성암과 변성암으로 분류하며, 화성암은 크게 화강암 등의 산성암과 현무암 등의 염기성암으로 구분하고 대체로 산성암에서 우라늄의 농도가 높고 염기성암은 낮은 우라늄 농도를 나타낸다[29].

그 결과 우라늄을 모원소로 하는 라돈의 농도도 유사한 경향을 가질 것으로 보인다. 또한 변성암의 생성원인은 두 가지로 열변성(접촉변성작용)과 압력변성(광역변성작용)으로 나뉘는데 지하수 내 라돈의 함량은 이러한 변성작용을 받았느냐보다는 변성 전 모양의 원래 구성에 크게 좌우된다[30]. 한편 퇴적암 중 쇄설성 퇴적암과 비 고화퇴적

물의 경우 라돈 함량은 어떤 모암조성(original composition)으로부터 유래되었느냐에 따라 달라지는데, 예를 들어 화강암의 물리적 풍화에 의해 형성된 화강사암 혹은 퇴적물의 경우 상대적으로 높은 라돈 함량을 보인다[30]. 그리고 석회암과 같은 탄산염암의 경우 낮은 라돈 함량을 보인다[31]. 국내 지하수의 자연방사성 물질 함량에 대한 최초의 전국적인 규모의 조사는 1999년부터 2002년까지 및 2006년부터 2007년까지 지하수의 자연방사성 물질 함량 실태조사가 국립환경과학원과 한국지질자원연구원에 의해서 이루어져 왔다[51].

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[32]. 자연방사성 물질의 지질별 함유특성 조사결과 국내 지하수에서 라돈의 함량은 화강암>변성암>옥천계 변성암>퇴적암>화산암 순으로 감소한다고 한다[32]. 라돈은 화강암과 화강편마암 계열에서 높았으며 특히, 백악기 흑운모 화강암지역에서 최고 높은 함량을 나타낸걸로 보고되었다[32].

이러한 자료를 바탕으로 광주광역시 지질도를 살펴본 결과 크게 4가지 암상으로 구분할 수 있으며 화강암류의 일종인 ‘대보관입암류화강암류(Jgr)’가 가장 많은 35.6%를 차지하고 있었으며, 퇴적층의 일종인 ‘충적층’이 27.8% 그 뒤로 화강편마암의 일종인 ‘소백산편마암복합체화강편(PCEsgrgn)’ 16.5%, 화산암류일종인 ‘경상누층군유천층군산성화산암’이 14.5%를 이루었으며 그 외 기타 지층이 5.6%를 차지하고 있었다 (Table 7).

Table 7. Gwangju geological data

Lithofacies	%	Geological time	stratum	Representative rocks
Qa	27.8	Quaternary Period	alluvium	Alluvium
PCEsgrgn	16.5	Precambrian age	Sobaegsan granite gneiss complex	Granite gneiss
Jgr	35.6	Jurassic period	Dabo intrusives granites	Granites
Kiv	14.5	Cretaceous period	Yucheon group Intermediate to basic volcanics	Intermediate to basic volcanics

이를 바탕으로 측정된 수원지별 라돈농도를 지층별 구분해 보았는데, 각 지층별 라돈농도를 종합한 결과 충적층에서 7.80 ± 4.88 Bq/L, 소백산편마암복합체화강편 36.14 ± 17.40 Bq/L, 대보관입암류화강암류 39.37 ± 33.42 Bq/L, 경상누층군유천층군 산성화산암 16.95 ± 8.02 Bq/L 농도를 보였으며(Table 8) 하강암류>화산암류>충적층류 순으로 기존에 알려진 화강암>변성암>육천계 변성암>퇴적암>화산암의 순서와 차이가 없음을 알 수 있었다.

Table 8. Underground water radon concentrations

Lithofacies	stratum	N	GM \pm GSD(Bq/L)
Qa	alluvium	4	7.80 ± 4.88
PCEsgrgn	Sobaegsan granite gneiss complex	4	36.14 ± 17.40
Jgr	Dabo intrusives granites	13	39.37 ± 33.42
Kiv	Yucheon group Intermediate to basic volcanics	4	16.95 ± 8.02

Table 9. Gwangju underground water radon concentrations

Water sources	Stratum	Theoretical initial radon concentration (Bq/L)
W-01	Dabo intrusives granites	49.46
W-02	Dabo intrusives granites	32.73
W-03	Dabo intrusives granites	42.67
W-04	Yucheon group Intermediate to basic volcanics	11.88
W-05	Yucheon group Intermediate to basic volcanics	26.52
W-06	Dabo intrusives granites	38.60
W-07	Dabo intrusives granites	121.76
W-08	Dabo intrusives granites	4.25
W-09	Dabo intrusives granites	83.12
W-10	Dabo intrusives granites	45.03
W-11	alluvium	12.04
W-12	Dabo intrusives granites	13.10
W-13	Dabo intrusives granites	11.73
W-14	Dabo intrusives granites	4.308
W-15	Dabo intrusives granites	48.00
W-16	Dabo intrusives granites	16.61
W-17	Yucheon group Intermediate to basic volcanics	20.41
W-18	Yucheon group Intermediate to basic volcanics	8.98
W-19	Sobaegsan granite gneiss complex	27.87
W-20	Sobaegsan granite gneiss complex	26.70
W-21	Sobaegsan granite gneiss complex	62.23
W-22	alluvium	12.02
W-23	alluvium	3.55
W-24	Sobaegsan granite gneiss complex	27.76
W-25	alluvium	3.61

제 3 절 토양 라돈농도측정

1. 측정 장비 및 방법

토양내 라돈가스의 농도는 기존에 알려진 바로 화강암(Jgr)과 화강편마암(PCEsgrgn) 계열에서 높게 나타난다고 보고되었으며[32], 이러한 점을 고려하여 토양 라돈농도를 측정하고자 광주권역 암상비율에 따른 측정지점을 선정하고자 하였으나, 광주광역시 인구 분포와 암상을 살펴보면 대부분의 거주지가 충적층류와 화강암류 기반에 거주하고 있었으며, 이러한 암반에 따른 라돈농도와 거주지를 고려하여 충적층류(Qa) 4지점, 화강편마암류(PCEsgrgn) 4지점, 화강암류(Jgr) 16지점 및 화산암류(kiv) 5지점 총 28 지점을 선정하였다.

Table 10. Gwangju representative geological and distribution

Lithofacies	%	Representative rocks
Qa	27.8	Alluvium
PCEsgrgn	16.5	Granite gneiss
Jgr	35.6	Granites
kiv	14.5	Intermediate to basic volcanics

토양라돈 선정지점은 앞서 고려한 암상 선정지역을 고려하여 광주광역시 내 야산이나 노지로 개간이나 개발의 흔적이 없는 장소를 선정하였으며(Table 11), 측정장비의 경우 지하수 라돈실험에서 사용한 RTM1688-2 장비를 사용하였으며, 계절적인 영향을 배제[41]하기 위하여 1500 mm X Φ 50 mm stainless tube를 이용하여 측정지점 토양 70 ~ 100 cm 깊이의 구멍을 확보하여 계측기와 연결된 soil probe 삽입 후(Figure 19) 토양 내 라돈가스와 probe와 계측기간 유로, 계측기 air chamber내부 공간에서의 충분한 평형 상태 유지를 위하여 장비 가동 후 30분간 기기안정화 및 내부용적으로 라돈기체의 build up 시간을 주었고, 그 후 10분 간격으로 6번 측정 후 평균농도를 이용하였다.

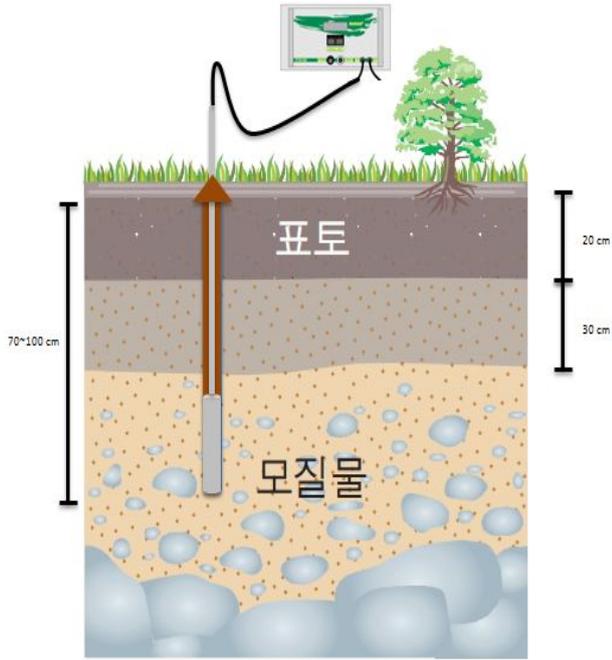


Figure 19. Soil radon measurement Scene.

Table 11. Soil radon measurement points

No.	sample point	Lithofacies	No.	sample point	Lithofacies
1	S-01	Jgr	15	S-15	Qa
2	S-02	Kiv	16	S-16	Jgr
3	S-03	Kiv	17	S-17	Jgr
4	S-04	Kiv	18	S-18	Jgr
5	S-05	Kiv	19	S-19	PCEsgr gn
6	S-06	Jgr	20	S-20	jgr
7	S-07	Jgr	21	S-21	Jgr
8	S-08	Qa	22	S-22	Qa
9	S-09	Jgr	23	S-23	Jgr
10	S-10	Jgr	24	S-24	PCEsgr gn
11	S-11	Qa	25	S-25	PCEsgr gn
12	S-12	Jgr	26	S-26	Jgr
13	S-13	Jgr	27	S-27	Jgr
14	S-14	Jgr	28	S-28	PCEsgr gn

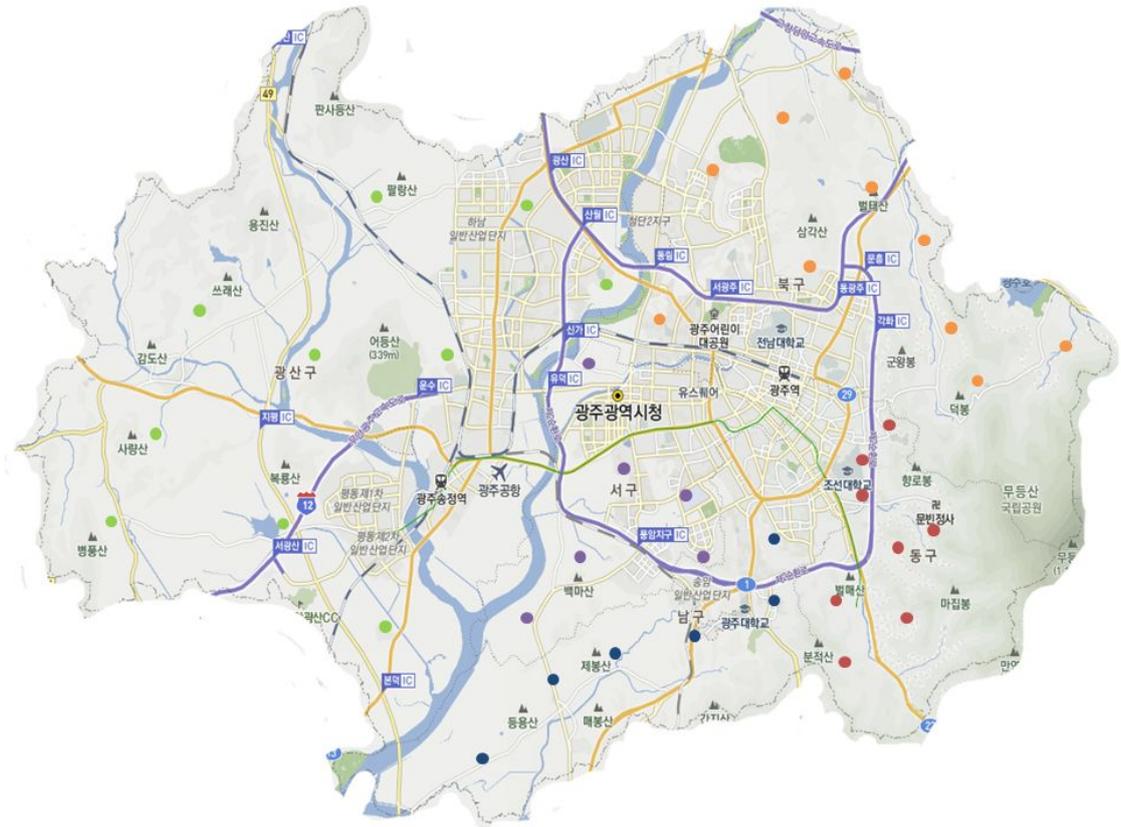


Figure 20. Soil radon measurement location.

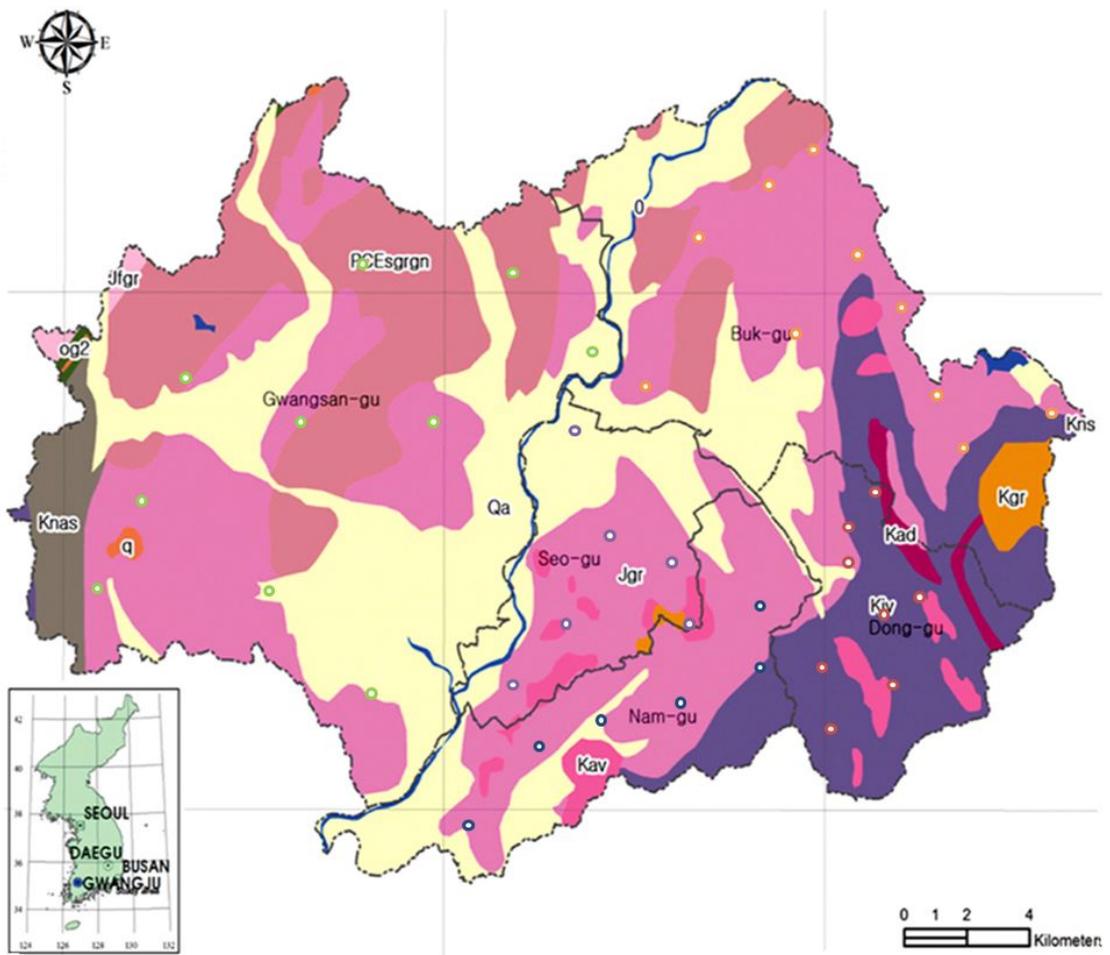


Figure 21. Soil radon measurement location and geologic maps.

2. 라돈농도 실험결과

측정된 라돈농도는 4,602 Bq/m³에서 125,365 Bq/m³까지 넓은 범위의 분포를 보이고 있으며 토론의 경우 279 Bq/m³에서 64,716 Bq/m³의 범위를 보이고 있다.(Table 12) 이러한 결과를 종합해볼 때 화강편마암계열(PCEsgrgn)에서 높은 평균농도를 보였으며, 충적층의 경우 상류쪽과 하류쪽 차이가 약 6배가량 보였으며, 화산암의 경우 지하수와 동일하게 다른 암상에 비하여 낮은 농도값을 보이고 있다.(Table 13)

이러한 결과는 기존에 화강암과 화강편마암 계열에서 높게 나오는 결과와 큰 차이는 없어 보이나 충적층의 경우 충적층의 모양에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

토양에서 발산되는 라돈의 양은 토양 내 함유되어 있는 우라늄 및 토륨의 양에 영향을 받을 것으로 생각되나, 2001년 한국원자력안전기술원에서 실시한 전국 단위 실내 라돈농도 조사에서는 가옥 내 라돈농도와 토양 중 라돈농도 간 상관계수를 0.23으로 낮은 수준의 관계만이 있다고 밝히고 있다[49].

광주광역시에서는 토양라돈으로 인하여 실내 라돈농도가 상승할 것으로 예상되는 지역은 수치추정분석을 통하여 모식화한 결과 관찰되지 않았다.(Figure 22) 하지만 토양 공기 중의 라돈농도는 얼마나 많은 라돈이 건물에 들어갈 수 있는지를 알 수 있는 척도가 되며, 일반적으로 토양 공기 중 라돈의 0.5% 정도가 실내로 침입할 가능성이 있다고 한다[47]. 즉, 실내라돈농도가 148 Bq/m³에 도달 할려면 토양 라돈가스의 농도는 약 300,000 Bq/m³정도가 되어야 한다는 것이다. 물론 실내 라돈농도에 영향을 미치는 인자는 다양하기 때문에 토양 공기 중 라돈농도가 높다고 해서 실내 공기 중 라돈농도가 높다고 단정적으로 이야기 할 수 없다. 하지만 토양 공기 중 라돈농도가 높은 지역일 경우 라돈 저감화 조치가 필요한 지역으로 분류를 통하여 신규 건축물 건축 시 관련 측정 및 조치가 필요한 지역으로 분류를 하여야 할 것이다.

Table 12. Radon concentrations measured by the point

No.	Measuring point	Lithofacies	Radon (Bq/m ³)	Thoron (Bq/m ³)
1	S-01	Jgr	14666 ± 967	17451 ± 959
2	S-02	Kiv	23275 ± 223	10642 ± 319
3	S-03	Kiv	12384 ± 1081	16820 ± 566
4	S-04	Kiv	6540 ± 830	7573 ± 312
5	S-05	Kiv	5160 ± 840	279 ± 19
6	S-06	Jgr	49833 ± 764	11215 ± 453
7	S-07	Jgr	56552 ± 1548	31447 ± 1065
8	S-08	Qa	7676 ± 946	17295 ± 808
9	S-09	Jgr	8223 ± 970	33657 ± 1022
10	S-10	Jgr	8608 ± 1367	63247 ± 866
11	S-11	Qa	38385 ± 1371	60704 ± 1048
12	S-12	Jgr	32772 ± 2000	44829 ± 1049
13	S-13	Jgr	14679 ± 1368	12234 ± 968
14	S-14	Jgr	15799 ± 940	15178 ± 797
15	S-15	Qa	4602 ± 720	12624 ± 375
16	S-16	Jgr	48125 ± 1677	44812 ± 1612
17	S-17	Jgr	10528 ± 1572	17982 ± 725
18	S-18	Jgr	6752 ± 919	26620 ± 2155
19	S-19	PCEsgr gn	37400 ± 1679	18443 ± 919
20	S-20	jgr	4347 ± 528	16978 ± 539
21	S-21	Jgr	16786 ± 1011	27600 ± 1064
22	S-22	Qa	31426 ± 978	24120 ± 1953
23	S-23	Jgr	8215 ± 1207	14652 ± 919
24	S-24	PCEsgr gn	15212 ± 1357	41370 ± 1096
25	S-25	PCEsgr gn	12832 ± 1497	39956 ± 1508
26	S-26	Jgr	125365 ± 3213	25866 ± 785
27	S-27	Jgr	29103 ± 2429	40558 ± 2031
28	S-28	PCEsgr gn	57478 ± 1761	64716 ± 1516

Table 13. Geological soil radon concentration

Lithofacies	Stratum	N	Radon	Thoron
			GM \pm GSD (Bq/m ³)	GM \pm GSD (Bq/m ³)
Qa	alluvium	4	20522.5 \pm 16896.1	28686.3 \pm 21861.2
PCEsgrgn	Sobaegsan granite gneiss complex	4	30731.0 \pm 20984.6	41121.6 \pm 18907.3
Jgr	Dabo intrusives granites	16	28147.4 \pm 30881.6	27770.9 \pm 14655.2
Kiv	Yucheon group Intermediate to basic volcanics	4	11840.2 \pm 8241.2	8828.8 \pm 6875.8



Figure 22. Analysis schematic estimate soil radon radon levels.

제 4 절 건축자재 라돈농도측정

1. 측정 장비 및 방법

가. 라돈모니터

지하수 및 토양 라돈측정에 사용한 장비인 RTM1688-2 장비를 이용하였다.

나. 실험용기

외부의 영향에서 단절시키고 통제가 가능하도록 밀봉 및 밀폐가 가능한 메디아병(500 ml) 및 아크릴 박스(216 l)를 이용하여 일정시간 측정을 수행하였다.

다. 시료

시료는 광주시내 각 건축 상가에서 구입하였으며 선행연구[46]에서 수행되었던 실험 중 라돈농도가 높게 나온 시료를 중심으로 시멘트와 석고텍스를 선정하였으며, 시료별 제작사를 달리하여 구입하였다.

Table 14. List of construction material samples

No.	Sample	Mass(g)	No.	Sample	Mass(g)
1	Cement A	184	4	Tex Gypsum A	1287
2	Cement B	194	5	Tex Gypsum B	1276
3	Cement C	269	6	Tex Gypsum C	1272

라. 실험

먼저 라돈가스의 최대 축적치를 구하기 위하여 각 시료별 라돈가스의 발산률은 시간에 따라 일정하다고 가정을 하고 다음과 같이 구할 수 있다[46].

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{1_0} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{\lambda_1^2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{1_0} e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{1_0} e^{-\lambda_2 t}$$

at $t = t_m$ $\frac{dN_2}{dt} = 0$

$$\therefore \frac{dN_2}{dt} = -\frac{\lambda_1^2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{1_0} e^{-\lambda_1 t_m} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{1_0} e^{-\lambda_2 t_m} = 0$$

$$\therefore \frac{\lambda_1^2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{1_0} e^{-\lambda_1 t_m} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{1_0} e^{-\lambda_2 t_m}$$

$$\Rightarrow (\lambda_1 e^{-\lambda_1 t_m} = \lambda_2 e^{-\lambda_2 t_m})$$

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t_m}$$

$$\ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = (\lambda_2 - \lambda_1)t_m$$

$$t_m = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$$

Ra - 226 : $1.62 \times 10^3 y$
Rn - 222 : $3.8235 d$

$$\lambda_1 = \frac{0.693}{t} = \frac{0.693}{1.622y \times 365d/y} = 1.1706 \times 10^{-6}$$

$$\lambda_2 = \frac{0.693}{t} = \frac{0.693}{3.825d} = 0.1812d$$

$$t_m = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$$

$$t_m = \frac{1}{0.1812 - 1.1706 \times 10^{-6}} \ln \frac{0.1812}{1.1706 \times 10^{-6}}$$

$$= 65.9124 \text{ day}$$

즉 65.9124일 후에 딸핵종의 방사능치가 최대치에 도달함을 알 수 있다.
 실험 일정상 시료 1건마다 소요되는 시간이 길어 효율성을 위하여 Rn-222 농도가 50%가 되는 시간을 구하여 붕괴에 의한 딸핵종의 생성을 구하기 위한 다음과 같은 식을 이용할 수 있다[46].

$$A_2 = A_1(1 - e^{-\lambda_2 t})$$

이 식을 통하여 ^{226}Ra 대비 ^{222}Rn 농도의 변화를 보면 1일에는 16.7%, 3.8일에는 50%, 5일에는 59.6%, 10일에 83.9%, 20일 97.3%, 30일 99.6%, 40일 99.9%에 이르는 것을 알 수 있으며 이를 Figure 23에 나타내었다[46].

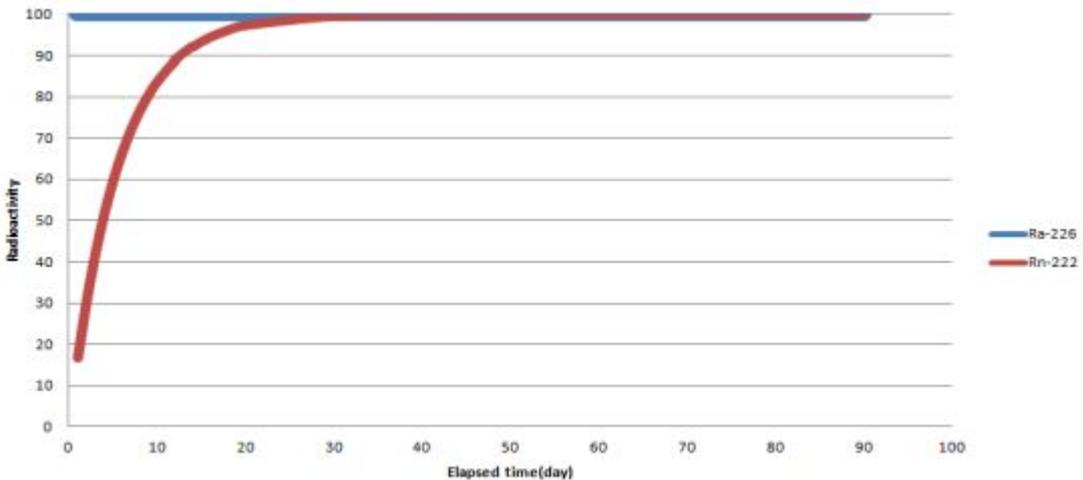


Figure 23. Ra226 Radionuclides to Rn222 radionuclide to decay and Build-up period.

각 시료는 실험장치 내 최대한 서로 겹치는 면이 없도록 하였으며 60분 동안 측정된 기록을 1회씩 결과 출력하도록 하였다. 측정기록은 측정 용기 내에서 50% Build-up되는 시간인 91.2 시간을 기준으로 전후 5시간 농도의 평균값을 대푯값으로 사용하여 기록 하였다. 측정기의 위치선정은 다음과 같은 사항을 고려하였다[33].

- (1) 측정기가 주변의 환경에 의해 방해받지 말아야 한다.
- (2) 측정기가 가열, 환기, 냉방을 위한 환기, 문, 팬, 창문 등에 의해 영향을

- 받으면 안된다.
- (3) 측정기는 햇빛이 비치거나 습도가 높은 곳에 설치하지 않는다.
 - (4) 측정지점은 창으로부터 90 cm 이상 이격시켜야 한다.
 - (5) 측정기는 바닥에서 최소 50 cm 이상, 다른 실내의 대상 물체부터 10 cm 이상을 이격시켜야 한다.



Figure 24. Using the experimental device and experimental scene samples.

상기 실험장치에서 시료가 들어있는 실험용기 내의 라돈 농도는 시간에 따라 점차 증가할 것이다. 이때 실험용기 내의 건축자재에서 라돈방출률은 다음 식을 이용하여 계산하였다[42].

$$\text{용기내의 단위시간당 라돈 방사능 농도} = \frac{\text{라돈방사능}}{\text{시간}} (Bq/h),$$

$$\text{용기내의 단위부피당 라돈 방사능 농도} = \frac{\text{라돈방사능}}{\text{시료제외 체적}} (Bq/m^3)$$

$$\frac{dR}{dt} = \frac{c}{V_d} - \lambda R \quad V_d = \text{시료제외 체적}$$

상기 식을 미분방정식으로 풀면

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

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

$R\lambda$ 은 단위부피 · 단위시간당 라돈 방사능 농도이며 이것을 C_v 이라 하면 챔버 내에서 라돈농도가 평형상태에 도달하게 되면 다음 식이 된다.

$$C_v = \frac{C}{V_d}$$

여기서 C_v (Bq/m³ · h)은 챔버내 단위부피당 단위시간에 생성되는 라돈의 방사능량이다. C (Bq/h)는 라돈 총 방출률을 의미하며 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$C = R \cdot \lambda \cdot V_d \text{ (Bq/h)}$$

C 값을 시료 질량 m 으로 나누어 주면 단위질량당 라돈방출률인 C_m 이 되며 그는 다음 식과 같다.

$$C_m = \frac{C}{m} \text{ (Bq/kg · h)}$$

또한 시료를 분말상태로 만들어 450 ml 용량의 폴리에틸렌용기에 가득 채워 공기가 통하지 않도록 밀봉하여 일정시간 경과 후 건축자재 중에 존재하는 ²²⁶Ra, ²³²Th, ²³⁸U 및 ⁴⁰K의 방사능 준위등 내부 천연핵종 분포를 파악하기 위하여 감마스펙트로메타(고순도 게르마늄 반도체(HPGe) 검출기, CANBERRA사)를 이용하여 80,000초 동안 계측 분석하여 농도준위를 조사 하였다.

²²⁶Ra의 방사능 농도 정량에서는 ²²⁶Ra의 딸핵종 중의 하나인 ²¹⁴Bi(609.3 keV)피크를 이용하였다. 그리고 ²³²Th 정량은 그의 딸핵종인 ²⁰⁸Tl(583 keV) 피크를 이용하였으며, ⁴⁰K 정량은 1460.8 keV의 피크를 이용하였다[2].

마. 측정프로그램

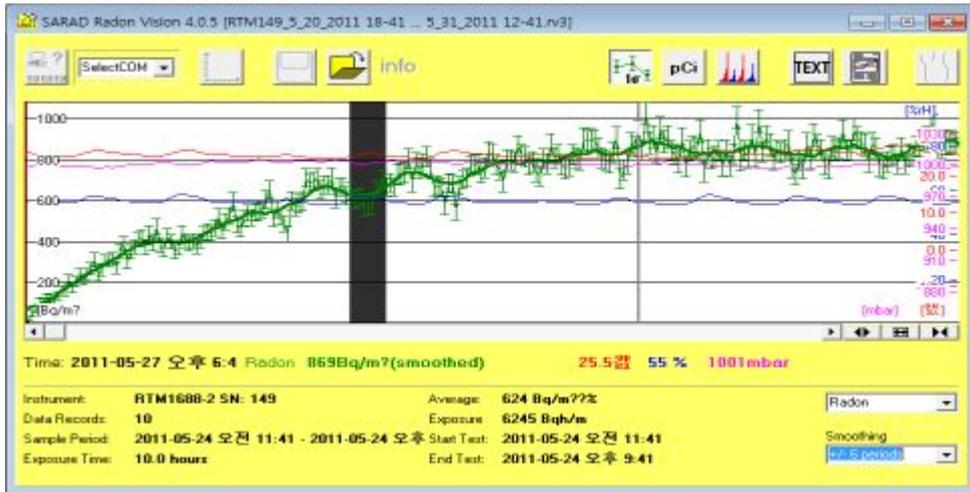


Figure 25. RTM1688-2 instrument program Radon Vision4.

측정프로그램으로는 RADON VISION4를 사용하여 측정하였고 계측기 세팅으로는 Pump Mode는 Continuous, Radon Mode는 Fast Mode를 사용하였으며, 60분 계측에 따른 신뢰 구간을 95%로 사용하였다[24].

이에 따른 검출기의 검출한도는

$$C = N / T(*S) = 3 \text{ cts} / (60 \text{ min} * 8 \text{ cts/min} * \text{kBq/m}^3)$$

$$= 0.00625 \text{ kBq/m}^3 = 6.25 \text{ Bq/m}^3$$

2. 라돈농도 실험결과

라돈모니터 분석결과 석고텍스의 경우 K사 제품이 340.55 Bq/kg·h로 가장 높은 라돈방사량을 보이고 있으며, 시멘트의 경우 D사 제품이 10.15 Bq/kg·h로 가장 높은 라돈방사량을 보이고 있다. 이러한 결과는 일본에서 조사된 건축재료의 발산률을 살펴보면, 석고보드 5.91 ~ 6.15 Bq/kg 시멘트 2.44 ~ 2.72 Bq/kg[44]와 비교 시 상당히 높은 값을 보이고 있다.

Table 15. Tex Gypsum radon release rate measurements

	A		B		C	
	Radon (Bq/m ³)	Radon emission rate (Bq/kg·h)	Radon (Bq/m ³)	Radon emission rate (Bq/kg·h)	Radon (Bq/m ³)	Radon emission rate (Bq/kg·h)
Radon	18.45 ± 10.08	47.07	90.47 ± 18.88	232.78	44.52 ± 16.62	114.91
Thoron	13.78 ± 3.80	35.15	19.75 ± 4.40	50.82	17.09 ± 5.34	44.11

Table 16. Cement radon release rate measurements

	A		B		C	
	Radon (Bq/m ³)	Radon emission rate (Bq/kg·h)	Radon (Bq/m ³)	Radon emission rate (Bq/kg·h)	Radon (Bq/m ³)	Radon emission rate (Bq/kg·h)
Radon	204.7 ± 24.0	10.15	155.9 ± 25.2	7.33	213.9 ± 26.5	7.25
Thoron	28 ± 5.7	1.39	34 ± 8.5	1.60	108.2 ± 22.9	3.67

3. HPGe 분석결과

Table 17. Construction materials HPGe results

	Cement(Bq /kg)			Tex Gypsum(Bq /kg)		
	A	B	C	A	B	C
K-40	290.56	262.09	852.03	93.57	88.24	91.97
Tl-208	9.09	8.74	11.12	-	3.29	2.41
Bi-212	33.46	28.66	39.49	-	-	-
Pb-212	23.27	24.15	27.01	2.1	9.68	8.95
Bi-214	37.25	27.85	29.45	20.48	154.15	117.91
Pb-214	40.60	28.22	32.10	23.58	153.36	123.35
Ra-226	67.76	49.92	45.37	2.13	156.15	146.45
Ac-228	27.60	25.63	34.75	-	10.38	-
Th-234	29.43	17.22	-	-	-	-
U-235	-	-	9.14	1.29	16.05	8.90

선량평가를 위해 HPGe 분석결과를 통해 얻은 핵종농도를 기준으로 라듐등가농도 (radium equivalent activity, Ra_{eq}), 외부방사선 장해인자(external exposure hazard index, H_{ex})와 감마방사선 흡수선량률(absorbed gamma dose rate, D)을 구하였다[43].

라듐등가농도는 다음 식을 이용하였다[34].

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + (A_{Th} \times 1.43) + (A_K \times 0.0077)$$

여기서, A_{Ra} , A_{Th} , A_K 는 시료의 ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K 농도(Bq/kg)이다. Ra_{eq} 은 라듐과 그 딸핵종에 의한 외부감마선량과 내부선량과 관련되어 있으며, Ra_{eq} 의 안전한 사용을 위해 최대 370 Bq/kg을 넘지 않아야 한다[34][35].

외부방사선 장애인자는 다음 식을 이용하였다.

$$H_{ex} = \frac{C_{Ra}}{370} + \frac{C_{Th}}{259} + \frac{C_K}{4810} \leq 1$$

여기서, C_{Ra} , C_{Th} , C_K 는 시료의 ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K 농도(Bq/kg)이다. H_{ex} 는 Ra_{eq} 값이 Ra_{eq} 의 최대값과 일치한다고 했을때 Ra_{eq} 식으로 얻어진 것으로 H_{ex} 값은 1 이하이다 [34][35].

감마방사선에 의한 흡수선량률은 단위 방사능 당 공기중 선량률로, 자연방사성물질이 존재하는 표면에서 1m 떨어진 거리의 값으로 UNSCEAR 보고서를 토대로 다음 식과 같이 계산되었다. 여기서 ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K 를 제외한 자연방사성 핵종은 무시하였다.

^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K 의 방사능농도에 대한 환산인자로 ^{226}Ra 일때 $0.462 \text{ nGy/h(Bq/kg)}^{-1}$, ^{232}Th 일때 $0.621 \text{ nGy/h(Bq/kg)}^{-1}$, ^{40}K 일때 $0.0417 \text{ nGy/h(Bq/kg)}^{-1}$ 적용하였다[36].

UNSCEAR,2000에 의하면 지구 감마방사선으로 받는 국내 공기 중 외부 흡수선량률의 범위를 18 ~ 200 nGy/h (평균 79 nGy/h)로 제시하고 있다.

$$D(\text{nGy/h}) = 0.462C_{Ra} + 0.621C_{Th} + 0.0417C_k$$

여기서, C_{Ra} , C_{Th} , C_K 는 시료의 ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K 농도(Bq/kg)이고, 감마방사선 흡수선량률의 단위는 nGy/h 이다[43].

시멘트와 석고 텍스에 대하여 핵종농도 측정 결과에 기준한 라듐등가농도(Ra_{eq})를 평가한 결과 시멘트의 경우 89.70 Bq/kg ~ 110.56 Bq/kg의 범위로 나타났으며 석고 텍스의 경우 5.85 Bq/kg ~ 170.67 Bq/kg의 범위로 나타났다.

외부방사선 장애인자(H_{ex})는 시멘트의 경우 0.28 ~ 0.43의 범위로 나타났으며 석고 텍스의 경우 0.03 ~ 0.48의 범위로 나타났으며,

감마방사선 흡수선량률(D)은 시멘트의 경우 50.39 nGy/h ~ 77.14 nGy/h의 범위로 나타났으며 석고 텍스의 경우 6.19 nGy/h ~ 81.83 nGy/h의 범위로 나타났다.

Table 18. Construction materials risk assessment

	Sample	Ra_{eq} (Bq/kg)	H_{ex}	D(nGy/h)
Cement	A	110.56	0.35	61.04
	B	89.70	0.29	50.39
	C	99.48	0.43	77.14
Tex Gypsum	A	5.85	0.03	6.19
	B	170.67	0.48	81.83
	C	159.96	0.45	77.05

제 5 절 실내 라돈농도측정

1. 측정 장비 및 방법

가. 라돈컵

본 연구에 사용된 라돈컵은 (주)알엔테크에서 상용화된 제품으로 고체비적검출기의 일종인 Cellulose nitrate(C6H8O9N2)성분의 LR-115 타입 필름과 멤브레인 filter를 결합한 Close type 라돈컵을 이용하였다. 멤브레인 filter는 라돈자핵종 및 토론이 본체 내부로 확산되는 것을 방지하고 라돈만 선별적으로 내부로 확산 침투되도록 한다[37].



Figure 26. Radon cup (alpha track) and solid-state track detector (LR-115).

일정기간 대기 중에 노출시킨 라돈컵의 LR-115를 실험실에서 10% NaOH 용액을 이용하여 60℃, 150분간 화학적으로 에칭 및 건조 후 CCD-camera를 이용 비적을 200배 확대한 다음 비적의 밀도(tracks/cm²)를 계산한 후 환산인자를 이용하여 라돈농도를 구한다[38].

$$C_{Rn} = K \times T / D$$

여기서 C_{Rn} , K , T 그리고 D 는 다음과 같이 정의된다[38].

C_{Rn} : 공기 중의 평균 라돈농도

K : 환산인자($\text{pCi/L} \cdot \text{day}/(\text{T}/\text{cm}^2)$)

T : 생성 비적수(T/cm^2)

D : 누적시간(day)

나. 측정방법 및 기간

실내 라돈농도를 측정하기 가장 적합한 기간으로 알려진 겨울철인 12월부터 2월까지 3개월간 실내 라돈농도를 측정하고자 하여, 광주광역시내 거주지를 중심으로 라돈컵 150개를 배포 하였으며 배포 시 다음 측정방법 ① 알파트랙 입구에 부착된 원형테이프를 떼어낸 후 ② 대표성 있는 공간(거실, 안방) 천정으로부터 약 1m 정도 떨어지도록 매달아 설치[39] 할 수 있도록 측정법 및 주의사항을 고지하였으나 최종적으로 측정기간 중 분실 및 원형테이프를 제거하지 않는 등 측정법 미흡으로 인하여 최종적으로 74개 라돈컵 라돈농도 자료를 본 논문자료로 사용하였다.



Figure 27. Indoor radon cup attached example.

2. 실내 라돈농도 실험결과

광주광역시 5개구 95개 행정동 중 동구 8개동, 서구 8개동, 남구 7개동, 북구 9개동, 광산구 6개동 총 38개 행정동 74 가구에 대하여 가구 내 라돈농도 측정을 완료한 결과 $42.5 \pm 29.8 \text{ Bq/m}^3$ 의 평균농도를 나타내었으며, 74가구 중 10개 가구가 74 Bq/m^3 을 초과하였으며, 그 중 1곳의 단독주택에서는 실내 라돈권고농도(148 Bq/m^3)를 초과한 거주지가 있다.

Table 19. Administrative districts by indoor radon concentrations

Sample point	Bq/m ³						
H-01	33	H-20	34	H-39	17	H-58	48
H-02	20	H-21	37	H-40	79	H-59	55
H-03	25	H-22	36	H-41	22	H-60	38
H-04	45	H-23	18	H-42	6	H-61	19
H-05	19	H-24	45	H-43	18	H-62	19
H-06	19	H-25	33	H-44	34	H-63	23
H-07	80	H-26	18	H-45	19	H-64	50
H-08	113	H-27	83	H-46	33	H-65	8
H-09	4	H-28	53	H-47	42	H-66	19
H-10	66	H-29	35	H-48	40	H-67	74
H-11	64	H-30	29	H-49	38	H-68	184
H-12	82	H-31	15	H-50	61	H-69	48
H-13	19	H-32	30	H-51	85	H-70	26
H-14	37	H-33	32	H-52	54	H-71	58
H-15	69	H-34	11	H-53	70	H-72	16
H-16	69	H-35	96	H-54	31	H-73	105
H-17	69	H-36	25	H-55	11	H-74	17
H-18	50	H-37	39	H-56	20		
H-19	59	H-38	21	H-57	23		

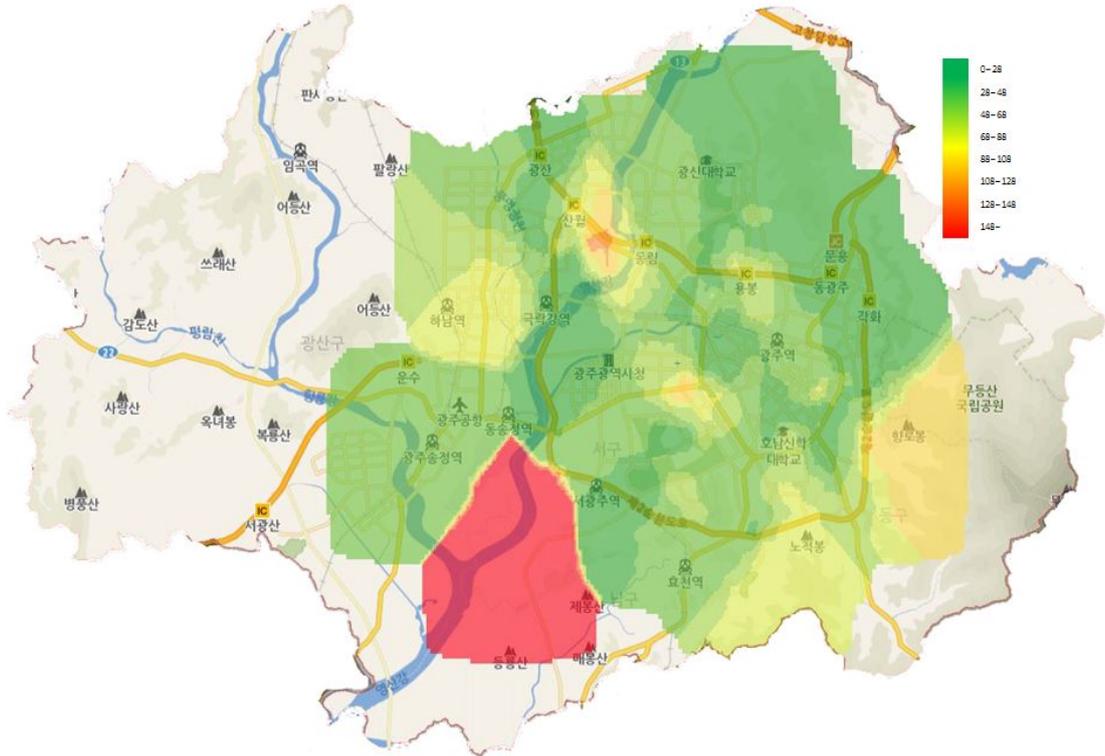


Figure 28. Indoor radon concentration distribution.

거주형태별로 살펴 본 결과 다세대 주택의 경우 $40 \pm 27.4 \text{ Bq/m}^3$, 아파트의 경우 $39 \pm 22.6 \text{ Bq/m}^3$ 단독주택의 경우 $39 \pm 22.6 \text{ Bq/m}^3$ 의 범위를 나타냈다. (Table 20) 이러한 결과는 기존 실내라돈연구결과와 같이 단독주택의 경우가 다른 주거형태에 비하여 높은 수준의 라돈농도를 보이는 것을 확인할 수 있다.

Table 20. Radon Concentration in Living

Dwelling pattern	N	Radon(Bq/m^3)	
		GM \pm GSD	Med
Multiplex house	11	40 ± 27.4	31
Apartment	51	39 ± 22.6	34
Detached house	14	58 ± 47.1	52

주거지 형태별이 아닌 거주 층에 따른 라돈농도를 살펴보고자 거주 층별 5개 층씩
 도수분포를 하여 살펴본 결과 1층부터 5층까지의 거주지 라돈농도는 45.5 ± 37.0
 Bq/m^3 , 6층부터 10층까지는 $30.4 \pm 14.6 \text{ Bq/m}^3$, 11층부터 15층까지는 44.9 ± 25.1
 Bq/m^3 , 16층부터 20층까지는 $51.7 \pm 26.4 \text{ Bq/m}^3$ 의 농도를 나타내었다(Table 21). 이러
 한 결과를 살펴볼 때 저층부와 고층부간에 라돈농도의 유의한 차이는 없는 듯 보였다.

Table 21. Radon concentration in a residential floor

Floor	N	Radon(Bq/m^3)	
		GM \pm GSD	Med
1-5	33	45.5 ± 37.0	35
6-10	18	30.4 ± 14.6	28
11-15	14	44.9 ± 25.1	45
16-20	9	51.7 ± 26.4	61

기존에 한국원자력연구원에서 수행된 연구결과에 따르면 가옥 내 라돈농도는 건물의
 높이 보다는 가옥 내의 환기상태, 생활습관, 주변 지형 등에 따라 좌우된다고 밝히고
 있다[45]. 하지만 본 연구결과 조사지점이 많지는 않아 단정적으로 결론 내리기 어려
 우나 고층부에서 라돈농도가 상대적으로 높게 나온 점을 보아 건축자체에 대한 연구의
 지속성이 필요할 것으로 보인다.

제 6 절 광주광역시 라돈위험도

광주광역시 라돈 위험도에 대하여 평가하기 위한 기초자료인 지하수에 용해되어 있는 라돈농도 및 토양 공극내 라돈농도, 가옥내 라돈농도를 바탕으로 지하수는 WHO 기준인 100 Bq/L, 토양은 실내라돈농도가 규제치에 도달할 수 있는 농도인 300,000 Bq/m³, 가옥내 라돈농도는 국내 권고수치인 148 Bq/L를 기준으로 하여 최고위험도를 100으로 환산하여 각 측정지점에 대하여 통합 후 수치추정분석을 통하여 Figure 29와 같이 도식화 하였다.

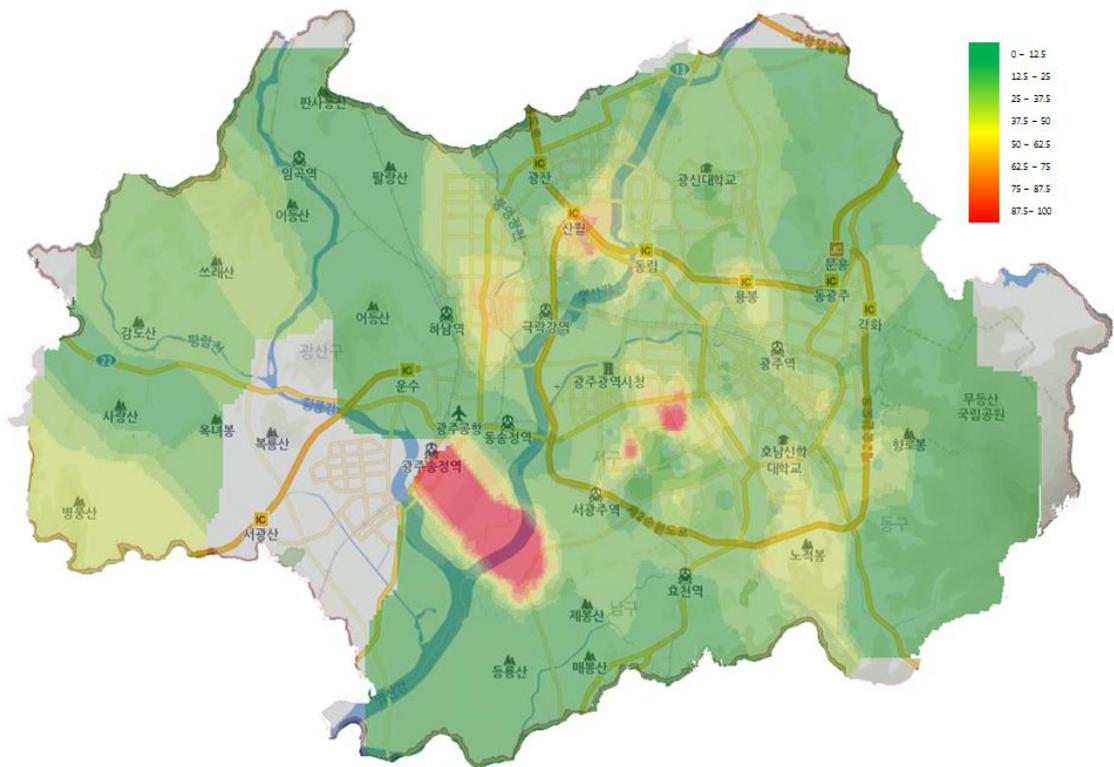


Figure 29. Gwangju radon risk map.

제 3 장 고 찰

본 연구에서는 에 대하여 지하수, 토양, 건축자재, 거주공간에 대한 라돈농도 및 방출량 실측을 통하여 라돈 분포특성 및 영향평가 방법론을 연구 하고자 하였다.

분포특성을 확인하고자 광주광역시에 대하여 조사를 수행하였으며, 기존에 라돈 관련 조사는 전국단위 가옥 라돈조사에서 몇몇 가구 및 초등학교나 지하철에 대한 교제 기관이나 개인 연구들만 수행되었으며, 본 연구에서 시행된 생활주변에 대한 전반적인 라돈조사는 시행된 적이 없었다.

본 연구 결과는 2016년 말 시행될 실내공기질관리법에서 광주광역시에 대하여 수행될 실내라돈조사에 대한 기초자료로서 합리적인 조사 수행에 대한 자료로 사용될 수 있으나 다음의 제한점도 동시에 고려되어야 할 것이다.

첫째, 지하수의 경우 개인관정이 측정에 주를 이루어 관정의 깊이 저수조 유무 등 관련 내용을 소유자에게 확인이 불가하여 조사가 이루어지지 못하였다. 하지만, 지하수 내 라돈농도는 바로 20미터 인접한 관정끼리도 40%의 농도차이가 보이는 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 점을 보아 지하수 내 라돈농도는 지질 기반뿐만 아니라 관정의 깊이 또한 영향을 미칠 것으로 사료된다. 따라서 추후 연구에서는 지하수 관정의 깊이 등 여러 변수에 의하여 변할 것을 유추 할 수 있을 것이다. 이러한 변수에 대한 추가적인 연구 수행을 통하여 지하수 내 라돈농도 평가가 이루어져야 할 것이다. 또한 광주광역시 지질 특성상 대부분의 지층이 화강암류 기반인 점을 보아 지하수 중 라돈의 함량이 높게 존재할 수밖에 없을 것이다. 실험결과도 WHO기준을 초과한 1지점뿐만 아니라, 미 EPA기준을 초과한 지점도 21지점이나 존재하였다. 물론, 지하수에 포함된 라돈의 경우 음용시에도 문제가 발생할 수도 있겠지만 그 문제는 미미할 것이며, 주로 지하수 라돈이 공기중으로 확산되어 호흡으로 인한 내부피폭문제가 더 클 것이다. 그리고, 기준치를 초과한 지하수의 음용 시 발생할 수 있는 문제점에 대한 행정기관에 고려가 필요할 것이나, 이러한 지하수 중 라돈의 저감은 교반이나 저수조를 통한 지체, 음용 전 끓이는 방법으로 손쉽게 저감할 수 있으나, 국내에서 지하수에 대한 라돈의 위험성을 대중적으로 알리거나 관련된 교육 등은 미흡한 실정이다.

둘째, 토양 라돈의 경우 건물내로 공급될 수 있는 라돈의 양을 파악할 수 있는 수치이지만 국내 관련 논문 및 관련 평가법에 대한 지침등은 미비하다. 이에 반해 국내 평균 실내라돈농도와 비슷한 독일의 경우 1998년에 전국토에 대한 토양 라돈농도의 평가

가 완료된 상태이다. 토양라돈농도 중 0.5%정도가 실내라돈농도에 영향을 미친다고 보면 광주광역시 토양 라돈농도는 최대 125,365 Bq/m³으로 실내 라돈농도에 63 Bq/m³ 정도 영향을 미칠 것으로 보인다. 하지만, 기존 주택에 대해서 토양 라돈의 영향에서 실내 라돈농도의 저감화를 위해서는 비용적인 측면이 무시할 수 없으므로 건축물 인허가에서부터 라돈 위험지역 및 고농도 토양 라돈지역에 대해서 고려할 필요성이 있을 것이다. 추가적으로 광주광역시에서 시행될 대규모 지하공간개발 등에서 토양 라돈농도 등에 대한 조사 및 연구는 지하공간 작업자의 보건측면에서 고려되어야 할 문제임으로 보다 정밀한 토양라돈조사는 이루어져야 할 것이다.

셋째, 실내라돈조사에서 중요한 점은 모집단의 수 일 것이다. 실내라돈 조사를 위하여 20%의 미 회수율을 고려하고 150여개의 계측기를 준비하였음에도 불구하고 실질적으로 사용된 계측기는 50%에 불과하여 충분한 수의 계측이 이루어지지 않았다. 또한 회수 여부에 대한 고려 뿐만 아니라 모집단 그룹선정에 대한 고려가 필요할 것이다. 주거형태별 라돈농도의 경우 단독주택이 높은 값을 보이고 있었으나, 고층아파트에 경우 일반적으로 라돈에 대하여 안전하다고 생각된 지점이었으나, 연구결과 다소 높은 값의 농도를 보이고 있음을 볼 때 고층부에 대한 라돈영향평가 및 관련 영향인자에 대한 확인 및 평가가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

제 4 장 결 론

본 논문에서는 라돈 분포특성 및 영향평가 방법론을 연구하고자 실내 라돈농도에 영향을 미칠 것으로 판단되는 지하수, 토양, 건축자재의 라돈방출량을 확인하였으며 또한 광주광역시 내 주거지에 대한 실내라돈농도측정을 실시하였다.

지하수에 함유된 라돈의 경우 광주광역시의 관정 25군대를 대상으로 하여 지하수 라돈농도를 측정된 결과 WHO의 기준농도인 100 Bq/L을 초과 하는 지역이 1곳(W-07) 존재하였으며, 지하수중 라돈농도 변화를 관찰한 결과 강우량이 많은 장마철보다는 갈수기에 관련 실험을 수행함이 적합할 것으로 보인다. 지층별 지하수중 라돈농도를 종합한 결과 총적층에서 7.80 ± 4.88 Bq/L, 소백산편마암복합체화강편 36.14 ± 17.40 Bq/L, 대보관입암류화강암류 39.37 ± 33.42 Bq/L, 경상누층군유천층군산성화산암 16.95 ± 8.02 Bq/L 농도를 보였다.

토양 공극 중 라돈의 경우 얼마나 많은 라돈이 실내로 들어갈 수 있는 지 척도로서 28지점에 대하여 실험결과 토양라돈으로 인하여 실내라돈이 규제치를 넘을 우려가 있는 곳으로 예상되는 곳은 존재하지 않았으며, 총적층에서 $20,522.5 \pm 16,896.1$ Bq/L, 소백산편마암복합체화강편 $30,731.0 \pm 20,984.6$ Bq/L, 대보관입암류화강암류 $28,147.4 \pm 30,881.6$ Bq/L, 경상누층군유천층군산성화산암 $11,840.2 \pm 8,241.2$ Bq/L 농도를 보였다. 하지만, 토양라돈의 경우 건축단계에서 확인 및 제어를 하지 않는 경우 추후 토양라돈의 저감화에는 많은 비용이 소요되므로 관련 조사는 지속적 수행이 필요할 것으로 보인다.

건축자재의 경우 시멘트와 석고텍스에 대하여 라돈 방출율 및 라듐등가농도, 외부방사선장해인자, 감마방사선 흡수선량율을 분석해 보았다. 그 결과 석고텍스의 경우 B사 제품이 232.75 Bq/kg·h로 가장 높은 라돈방사량을 보이고 있으며, 시멘트의 경우 A사 제품이 10.15 Bq/kg·h로 가장 높은 수치를 보이고 있으며, 라듐등가농도, 외부방사선장해인자, 감마방사선 흡수선량율의 경우 국제 기준을 초과하는 건축자재는 없었다.

가옥은 74가구 중 1개 가구(H-68)가 실내 라돈권고농도를 초과 하였으며, 평균 42.5

$\pm 29.8 \text{ Bq/m}^3$ 으로 국내 평균보다 낮은 수치를 보이고 있었다. 거주형태별로 살펴 본 결과 다세대 주택의 경우 $40 \pm 27.4 \text{ Bq/m}^3$, 아파트의 경우 $39 \pm 22.6 \text{ Bq/m}^3$ 단독주택의 경우 $39 \pm 22.6 \text{ Bq/m}^3$ 의 범위를 나타내었고, 거주층으로 구분결과 1층부터 5층까지의 거주지 라돈농도는 $45.5 \pm 37.0 \text{ Bq/m}^3$, 6층부터 10층까지는 $30.4 \pm 14.6 \text{ Bq/m}^3$, 11층부터 15층까지는 $44.9 \pm 25.1 \text{ Bq/m}^3$, 16층부터 20층까지는 $51.7 \pm 26.4 \text{ Bq/m}^3$ 의 농도를 나타내었다.

이러한 점을 살펴보았을 때 광주광역시에서 라돈위험도는 어느 정도 안심할 수 있다고 볼 수 있으나, 장기적인 국민건강보호 측면에서 실내라돈 규제와 더불어 일부 국가들과 마찬가지로 제한치와 수리요구 농도를 마련하는 것이 좋을 것으로 보이며 그 수준은 미국과 동일한 74 Bq/m^3 로 제안할 필요성이 있을 듯 하다. 이러한 측면에서 라돈에 대한 지자체나 규제기관에서 꾸준한 관심이 필요할 것이다.

참고문헌

- [1] <http://www.iaqinfo.org/radon/>.
- [2] 노병환, 2005, 방사선 안전규제기술 개발, 한국원자력안전기술원.
- [3] David Bodansky, Maurice A. Robkin and David R. stadler, 1987, Indoor Radon and Its Hazards, University of Washinton Press.
- [4] <http://www.doopedia.co.kr>.
- [5] ICRP, 1993, ICRP Publication 65 "Protection Against Radon-222 at Home and at Work" .
- [6] National Research Council, 1999, BEIR VI Rept "Health Effects of Exposure to Radon" National Academy Press.
- [7] Moon, C., O. Brandli, C. Schindler, U., Ackemann-Liebrich, P. Leuenberger and SAPALDIA team, 1998, Personal exposure to nitrogen dioxide in Switzerland, The Science of the Total Environmen, 215, 243-251.
- [8] <http://www.kisti.re.kr/>.
- [9] EPA, 1998, EPA 600-R-96-022 "Technical Basis for a Candidate Building Materials Radium Standard".
- [10] 실내 라돈 저감 가이드라인, 2010, 환경부.
- [11] <http://www.WHO.int>
- [12] <http://www.doopedia.co.kr>.
- [13] 장미, 2003, 건축자재에 의한 실내 라돈 농도 평가에 관한 연구, 서울대학교대학원.
- [14] UNSCEAR, 1988. SOURCES EFFECTS AND RISKS OF IONIZING RADIATION.
- [15] 주승환, 1995, 라돈 방사능과 생활 환경, 제일목 계축문화사.
- [16] CDC, 2001, "Injury Prevention and Control Reports". the Centers for Disease Control and Prevention' s National Center 1999-2001.
- [17] EPA, "Assessment of Risk From Radon in Homes", EPA 402-R-03-003.
- [18] EPA, "A Citizen's Guide To Radon", EPA 402-K-09-001.
- [19] <http://kostat.go.kr>.
- [20] 라돈의 실내공기질 규제에 따른 위해저감 효과 및 건강 편익 산정. 2014, 한국환경정책평가연구원.

- [21] EPA, Radon Reduction Techniques for Detached House, EPA-625-5-87-019.
- [22] <http://www.epa.gov/radon/>.
- [23] WHO, Radon and health, 2002.
- [24] RTM1688-2 user manual.
- [25] 한일수, 2006, 전주시 아파트 라돈농도의 측정 및 분석, 전북대학교 대학원.
- [26] 강성아, 2007, 실내 라돈 측정에 있어서 실내공간의 체적과 측정되는 라돈농도의 상관관계 연구, 전북대학교 대학원.
- [27] 정재형, 2008, 라돈 및 라돈 딸핵종의 시·공간적 모니터링과 상관성 분석, 서울산업대학교 대학원.
- [28] Lee, B.J., Kim, J.C., Kim, Y.B., Cho, D.L., Choi, H.I., Chun, H.Y., and Kim, B.C., Geologic report of the Gwangju sheet(1:250,000), 1992, Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 82p.
- [29] Egidi P, 1997, Introduction to naturally occurring radioactive material, 42nd Annual Meeting of the Health Physics Society, p. 48.
- [30] 이진용, 2008, 지하수내 우라늄, 라듐과 라돈의 발생, 건강위해 및 저감방법에 대한 고찰, 지질학회지, 44권, p341~352.
- [31] Zapecza, O.S., and Szabo, Z., 1986, Natural radioactivity in ground water—a review” , USGS Water-Supply Paper 2325, Ground Water Quality: Hydrologic Conditions and Events, USGS, 50-57 p.
- [32] 지하수에 우라늄, 라돈 등 자연방사성물질 함유, 2011.08.11, 환경부.
- [33] 실내공기중 라돈 측정 지침, 2000.5.22, 환경부예규 제202호
- [34] Beretka, J., Mathew, P. J., 1985, Natural Radioactivity of Australian building materials, industrial wastes, and by-products, Health Physics, 48, 87-95.
- [35] Xinwei Lu, Xiaodan jia and Fengling Wang, 2006, Natural Radioactivity of coal and its by-products in the Baoji coal-fired power plant, Chin. Current Science, 91, 11, 1508-1511.
- [36] El Mifi E.M., Hilal M.A., Khalifa S.M., Aly H.F., 2006, Evaluation of U, Th, K and emanated radon in some NORM and TENORM samples, Radiation Measurements, 41, 627-633.
- [37] 전재식, 이호찬, 이지영, 김주영, 김민영, 박영웅, 2008, 장기라돈 측정을 위한

- LR-115 고체비적검출기의 환산인자 도출, 한국 대기환경학회 추계 학술대회 논문집.
- [38] 전재식, 2007, 서울지하철역 라돈의 시공간적 변화와 기여원, 서울시립대학교.
- [39] <http://www.radon.co.kr>.
- [40] 제현국, 2010, 국내외 라돈정책 및 라돈산업의 현황, 한국지구시스템공학회지, p400.
- [41] Adam R. Hutter, 1996, Spatial and temporal variations of soil gas ^{220}Rn and ^{222}Rn at two sites in New Jersey, Environment International.
- [42] L.S. Quindos, P.L. Fernandez and J. Soto., 1994, A Method for the Measurement of the Emanation Factor for ^{222}Rn in Small Samples of Porous Materials, oxford journals.
- [43] 노병환, 2007, 방사선안전규제기술개발:국민방사선위해도 평가, 한국원자력안전기술원.
- [44] 建築物内のラドン濃度と建材からのラドンの放出, 木材学会誌 38.2.
- [45] 김창규, 2002, 국민 방사선위해도 평가 및 전국 실내 라돈방사능 조사, 한국원자력안전기술원.
- [46] 주용진, 2012, 생활주변 건축자재로부터 대기로 방출되는 라돈-222 농도측정, 조선대학교 대학원.
- [47] J.P. McLaughlin E.S. Simopoulos F. Steinhäusler, 2002, The Natural Radiation Environment VII: Seventh International Symposium on the Natural Radiation Environment (NRE-VII) Rhodes, Greece.
- [48] <http://www.biz-gis.com/XRayMap/>.
- [49] 고상기, 2009, 전국라돈실태조사, 한일원자력.
- [50] 최임조, 2008, 대구시 다중이용시설에서의 라돈농도분포 및 특성평가, 경북대학교 산업대학원.
- [51] 조병욱, 추창오, 김문수, 이영준, 윤욱, 이병대, 2011, 이천 화강암 지역 지하수의 우라늄과 라돈 함량 특성, 지질공학지