

2012年 2月

碩士學位 論文

생활주변 건축자재로부터 대기로
방출되는 라돈-222 농도측정

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

朱 勇 珍

생활주변 건축자재로부터 대기로
방출되는 라돈-222 농도측정

The Measurement of Radon-222 Concentration for Release Gas
into the Atmosphere from the Building Material

2012年 2月 24日

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

朱 勇 珍

생활주변 건축자재로부터 대기로
방출되는 라돈-222 농도측정

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

2011年 10月

朝鮮大學校 大學院

原子力工學科

朱 勇 珍

朱勇珍의 碩士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 李 庚 鎭 (印)

委 員 朝鮮大學校 助教授 金 辰 源 (印)

委 員 朝鮮大學校 教授 鄭 運 官 (印)

2011 年 11 月

朝鮮大學校 大學院

목 차

그림 목차	ii
표 목차	iv
ABSTRACT	vi
제1장 서 론	1
제2장 본 론	3
제1절 개 요	3
1. 라돈의 특성	3
2. 라돈의 자핵종 및 모핵종의 특성	3
3. 라돈의 위해성	6
제2절 건축자재에서의 라돈농도측정	11
1. 측정 장비 및 방법	11
2. 공기 중 라돈농도 실험결과	20
3. HPGe 분석결과	50
제3절 결 과	56
제3장 결론 및 향후과제	56
부 록	62

표 목 차

표 2.1.1	Rn ²²² 와 단수명 딸핵종의 붕괴특성	4
표 2.1.2	RADON RISK IF YOU SMOKE	7
표 2.1.3	RADON RISK IF YOU VE NEVER SMOKED	8
표 2.2.1	시료목록	15
표 2.2.2	시료(시멘트계-텍스) 질량	20
표 2.2.3	시료(시멘트계-텍스) 시험시 공시료 측정치	21
표 2.2.4	시료(시멘트계-텍스) 측정치	22
표 2.2.5	시료(적벽돌) 질량	23
표 2.2.6	시료(적벽돌) 시험시 공시료 측정치	24
표 2.2.7	시료(적벽돌) 측정치	25
표 2.2.8	시료(에코카라트) 질량	26
표 2.2.9	시료(에코카라트) 질량 시험시 공시료 측정치	27
표 2.2.10	시료(에코카라트) 질량 측정치	28
표 2.2.11	시료(시멘트벽돌) 질량	29
표 2.2.12	시료(시멘트벽돌) 시험시 공시료 측정치	30
표 2.2.13	시료(시멘트벽돌) 측정치	31
표 2.2.14	시료(타일) 질량	32
표 2.2.15	시료(타일) 시험시 공시료 측정치	33
표 2.2.16	시료(타일) 측정치	34
표 2.2.17	시료(황토타일) 질량	35
표 2.2.18	시료(황토타일) 시험시 공시료 측정치	36
표 2.2.19	시료(황토타일) 측정치	37
표 2.2.20	시료(석고타일) 질량	38
표 2.2.21	시료(석고타일) 시험시 공시료 측정치	39
표 2.2.22	시료(석고타일) 측정치	40
표 2.2.23	시료(시멘트블럭) 질량	41
표 2.2.24	시료(시멘트블럭) 시험시 공시료 측정치	42
표 2.2.25	시료(시멘트블럭) 측정치	43

표 2.2.26	시료(고령토벽돌) 질량	44
표 2.2.27	시료(고령토벽돌) 시험시 공시료 측정치	45
표 2.2.28	시료(고령토벽돌) 측정치	46
표 2.2.29	시료(석고보드) 질량	47
표 2.2.30	시료(석고보드) 시험시 공시료 측정치	48
표 2.2.31	시료(석고보드) 측정치	49
표 2.2.32	텍스(시멘트계) HPGe시료 분석치	51
표 2.2.33	에코카라트 HPGe시료 분석치	52
표 2.2.34	시멘트블럭 HPGe시료 분석치	53
표 2.2.35	황토타일 HPGe시료 분석치	54
표 2.2.36	시멘트블럭 HPGe시료 분석치	55
표 2.2.37	석고보드 HPGe시료 분석치	56
표 2.3.1	시료별 라돈/토론 방사량	57
표 2.3.2	시료별 라돈/토론의 3.3m ² 시공시 농도	58
표 2.3.3	각 시료별 HPGe 분석치	58
표 2.3.4	건축 재료에 대한 데시케이터 내의 포화 라돈농도(목재학회지, 일본)	59
표 2.3.5	IAEA 등에서 공산품 내의 방사능 양을 제한하기 위한 기준(안)	60
표 2.3.6	건축자재에 존재하는 라듐의 양과 라돈 위험지수	60
표 2.3.7	다양한 건축자재에 존재하는 라듐의 양의 예와 라돈 위험지수	61

그림 목 차

그림 1.1.1	생활환경에 있는 방사선의 종류와 그들의 양	1
그림 2.1.1	우라늄(U^{238}) 붕괴도	5
그림 2.1.2	토륨(Th^{232}) 붕괴도	6
그림 2.1.3	라돈가스의 유입경로	9
그림 2.1.4	라돈가스 실내유입경로	9
그림 2.2.1	SARAD의 RTM1688-2 라돈 모니터	11
그림 2.2.2	RTM1688 측정시스템 개략도	11
그림 2.2.3	Radon chamber operation	12
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	아크릴재 실험용기	15
그림 2.2.8	모핵종 Ra^{226} 에서 자핵종 Rn^{222} 로 붕괴 및 Build-up 기간	17
그림 2.2.9	실험시기와 시료를 이용한 실험장면	18
그림 2.2.10	RTM1688-2 계측기 프로그램 Radon Vision4	19
그림 2.2.11	시료(시멘트계-텍스) 사진	20
그림 2.2.12	시료(시멘트계-텍스) 전자주사현미경 500 배율 사진	21
그림 2.2.13	시료(적벽돌) 사진	23
그림 2.2.14	시료(적벽돌) 사진 전자주사현미경 500 배율 사진	24
그림 2.2.15	시료(에코카라트) 사진	26
그림 2.2.16	시료(에코카라트) 전자주사현미경 500 배율 사진	27
그림 2.2.17	시료(시멘트벽돌) 사진	29
그림 2.2.18	시료(시멘트벽돌) 전자주사현미경 500 배율 사진	30
그림 2.2.19	시료(타일) 사진	32
그림 2.2.20	시료(타일) 전자주사현미경 500 배율 사진	33
그림 2.2.21	시료(황토타일) 사진	35
그림 2.2.22	시료(황토타일) 전자주사현미경 500배율 사진	36
그림 2.2.23	시료(석고타일) 사진	38

그림 2.2.24 시료(석고타일) 전자주사현미경 500 배율 사진	39
그림 2.2.25 시료(시멘트블럭) 사진	41
그림 2.2.26 시료(시멘트블럭) 전자주사현미경 500배율 사진	42
그림 2.2.27 시료(고령토벽돌) 사진	44
그림 2.2.28 시료(고령토벽돌) 전자주사현미경 500 배율 사진	45
그림 2.2.29 시료(석고보드) 사진	47
그림 2.2.30 시료(석고보드) 전자주사현미경 500배율 사진	48
그림 2.2.31 HPGe 분석용 시료	50

ABSTRACT

The Measurement of Radon-222 Concentration for Release Gas into the Atmosphere from the Building Material

Ju, Yong - jin

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

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

We are exposed to a radioactive dose of 2.4 mSv annually. Among these, some 1.3 mSv is from Radon and its progeny, and 79% of this radon exposure dose is by our Radon inhalation indoors. This study provides some information of key factors affecting indoor radon concentration through measurement of radon and its daughter nuclide produced from Uranium and Thorium decay contained in building materials around us.

Using RTM1688-2, Silicon Surface-Barrier Detector that can measure both Radon and Thorium at the same time, Radon concentration was measured for 10 kinds of construction materials in the experimental container. Building materials were put in the airtight acrylic container with a volume of 216 l and sealed; radon concentration was measured for 10 hours at 60-minute interval starting from the 91 st hour when Rn-222 concentration reached 50% of Ra-226.

Radiometric quantity of 0.64 Bq/m³Kg ~ 121.7 Bq/m³Kg was obtained per unit mass: Tile(clay+limestone) 0.64 Bq/m³Kg < Kaolin Brick 0.7 Bq/m³Kg < Tile(gypsum) 0.82 Bq/m³Kg < Red Brick 1.1 Bq/m³Kg < Loess Tile(loess+charcoal) 6.75 Bq/m³Kg < Gypsum Board 11.04 Bq/m³Kg < Ecocarat 12.22 Bq/m³Kg < Cement Brick 23.71Bq/m³Kg < Cement Block 28.07 Bq/m³Kg < Texture(cement) 121.7 Bq/m³Kg

Calculation based on the amount of materials required in 3.3m² in building showed 24.6Bq/m³ ~ 13065.2Bq/m³ range: Tile(gypsum) 24.6Bq/m³ < Tile(clay+

limestone) $38.4\text{Bq/m}^3 < \text{Gypsum Board } 208.8\text{Bq/m}^3 < \text{Loess Tile(loess+charcoal) } 221.3\text{Bq/m}^3 < \text{Kaolin Brick } 225.0\text{Bq/m}^3 < \text{Ecocarot } 382.9\text{Bq/m}^3 < \text{Red Brick } 441.7\text{Bq/m}^3 < \text{Texture(cement) } 2811.6\text{Bq/m}^3 < \text{Cement Brick } 10875.0\text{Bq/m}^3 < \text{Cement Block } 13065.2\text{Bq/m}^3$

Among the samples, high radon emission building materials such as Texture(cement), Ecocarot, Cement Brick, Loess Tile, Cement Block and Gypsum Board were analyzed utilizing Bi^{214} (609.3KeV) peak, Tl^{208} (583 keV) peak, and K^{40} (1460.8 keV) peak with HPGe. Hazard indices were calculated with the measured radioactivity levels of Ra^{226} , Th^{232} and K^{40} . Hazard index of all materials was in the range of 0.07 ~ 0.51 which did not exceed the national recommendation of 1: Texture(Cement) 0.51, Cement Brick 0.39, Cement Block 0.39, Ecocarot 0.31, Loess Tile 0.27, Gypsum Board 0.07.

In this study to evaluate the exterior exposure dose on sample materials, the hazard level was evaluated to be within recommendation value, but it still indicates a precautionary principle in selecting and applying building materials to reduce the radon exposure. Also, Ecocarot appeared to be worth of further study for its peculiarity based on comparison between radon emission rate and amount of nucleid, which seemed to have a close relation with thickness, surface treatment, porosity and density of construction materials. Effects of radon was evaluated and some methods were suggested in this study to reduce personal exposure dose. Positive publicization and control of the authority is invited to use building material with low radon emission.

제 1 장 서 론

모든 건축자재는 라돈뿐만 아닌 소량의 방사성물질을 함유한다. 암석과 토양에는 우라늄, 토륨의 붕괴생성물과 칼륨의 방사성 동위원소를 포함한 천연방사성핵종을 함유한다. 이러한 암석과 토양을 이용한 건축자재를 사용할 경우 우리는 방사선피폭에서 자유로울 수 없다.

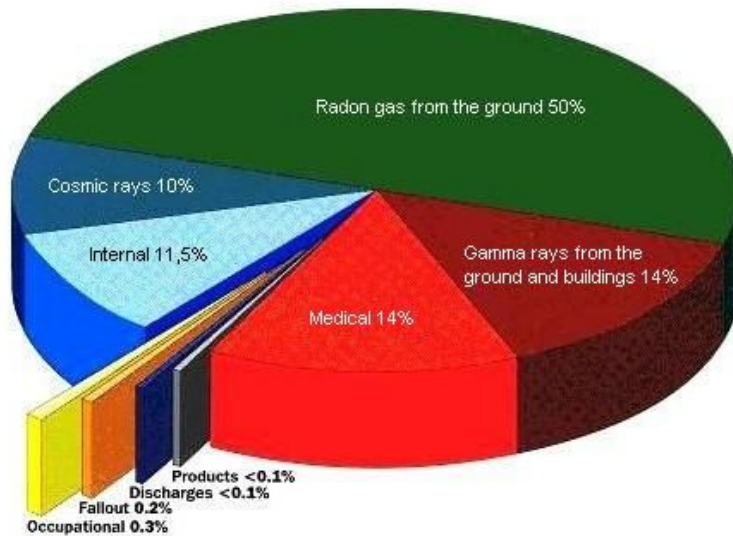


그림 1.1.1 생활환경에 있는 방사선의 종류와 그들의 양

그림1.1.1은 영국 국가방사선방호청(NRPB)이 생활하면서 받고 있는 방사선의 종류를 백분율을 나타내고 있다. 이 자료에 의하면 우리가 천연에서 받고 있는 자연 방사선은 85%이고, 사람이 만든 것은 15% 밖에 되지 않는다. 이 중에서 대부분 자연방사선은 라돈(50%)이 차지한다.¹⁾

라돈 가스는 건축물의 벽이나 바닥 천장 혹은 주변 흙 등에 포함되어 있다가 건물 틈새로 스며들고, 밀폐된 공간에서 우라늄이 함유된 건축자재에서 생성되어 공기 중 농도가 높아지기도 한다. 이 라돈은 호흡할 때 몸에 들어와 피폭선량을 증가시키며 폐암을 유발시키기도 한다.²⁾

라돈뿐만이 아닌 전체적인 실내 공기 질을 위해서 공기교환이 필요하며, 이는 실내 공기 질 상승뿐만 아닌 라돈저감 효율은 좋지만 여름이나 겨울에는 에너지 손실을 초

래한다. 따라서 주된 라돈 발생원이 건축자재일 경우 애초에 라돈의 발생원이 되는 건축자재의 사용을 피하는 것이 에너지 효율적인 측면에서 낫다고 할 수 있다.

1996년 미국 EPA 연구보고서 ‘Technical Basis for a Candidate Building Materials Radium Standard’ 에 따르면 건축자재 콘크리트 내에 사용하는 골재 및 시멘트는 Ra²²⁶ 함량 기준 370 Bq/Kg, 콘크리트 자체는 180 Bq/Kg (5 pCi/g)를 초과해서는 안 된다고 권고 하고 있다.³⁾

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

현대사회의 대중은 실내에서 대부분 시간을 보내며, 그 주변 환경 건축물로 인한 영향으로 추가적인 피폭요인을 생각할 때 개인피폭선량의 대부분을 이루는 자연방사선피폭의 영향에 대하여 무시할 수 없게 되었다. 이를 통해 ICRP-65(Protection Against Radon-222 at Home and at Work) 및 환경부 ‘실내 공기질 기준치’ 를 참고로 건축자재에 포함된 라듐의 양을 통하여 발생하는 라돈의 영향을 파악하여 개인피폭선량을 저감할 수 있는 방법을 연구 하고자 한다.

제 2 장 본 론

제 1 절 개 요

1. 라돈의 특성

라돈은 지각의 암석이나 토양 중 천연적으로 존재하는 우라늄(U^{238})과 토륨(Th^{232})이 몇 단계 방사성붕괴를 거친 후 생성되는 불활성기체이다. 라돈은 색이 없고, 맛이 없으며, 냄새가 나지 않은 방사성 가스로서 가장 무거운 기체 중에 하나이다. 공기나 천연수 속에도 적은 양이 함유되어 있으며 우라늄광물 속에 흡착되어 존재하며 광천·온천·지하수 등에 용해되어 있다. 라돈은 비활성기체로 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. 또한 먼지나 미립자에 잘 달라붙어 떠돌아다니게 되며 우리가 호흡을 하면 호흡기를 통하여 폐에 들어가 호흡기계 피폭을 일으키며, 자연 상태 라돈에서 방출되는 방사선은 인체에 영향을 주지 않으나, 라돈이 광산이나 지하같이 밀폐된 공간에 축적되어 있을 경우 폐암을 유발시킨다는 보고가 있다.

동위원소로는 천연 동위원소 Rn^{219} (악티논, An), Rn^{220} (토론, Tn), Rn^{222} 3종이 존재하는데, Rn^{219} 와 Rn^{220} 은 반감기가 짧아 공기 중으로 방출되는 양이 Rn^{222} 에 견주어 매우 적기 때문에 보통 라돈이라고 하면 Rn^{222} 를 가리킨다. Rn^{222} 는 동위원소 중에서 수명이 가장 길어 반감기가 3.825일이고 인공 동위원소로 20여 종이 발견되었다. 라돈 원자는 알파 방사선을 내놓으면서 붕괴되어 방사성 원소인 폴로늄의 원자가 된다.⁵⁾

2. 라돈의 자핵종 및 모핵종의 특성

천연 동위원소 중 두 종류의 라돈 동위원소가 큰 의미를 갖는데 천연 방사성핵종의 우라늄 계열에서 나타나는 라듐-226(Ra^{226})의 붕괴생성물인 라돈-222(Rn^{222})와 토륨 계열에서 나타나는 Ra^{224} 의 붕괴생성물인 라돈-220(Rn^{220})이다. 이들 근원에 따라 이 두

동위원소를 통상 라돈과 토론으로 부른다. 라돈은 불활성기체이며 두 동위원소 모두 고체상의 원소로 붕괴하는데 이 붕괴생성물 원자들은 전하를 띠기 때문에 공기 중에 존재하는 응축핵이나 먼지 또는 물체의 표면에 부착된다.

표 2.1.1 Rn²²²와 단수명 딸핵종의 붕괴특성⁶⁾

방사성 핵종	반감기	주요 방사선 에너지 및 방출률(y)					
		α-ray		β-ray		γ-ray	
		에너지 (MeV)	y(%)	최대에너지 (MeV)	y(%)	에너지 (MeV)	y(%)
Rn ²²²	3.824d	5.49	100	-	-	0.51	0.07
Po ²¹⁸	3.05min	6.00	100	0.33	0.1	-	-
Pb ²¹⁴	26.8min		-	1.02	6	0.35	37
				0.70	42	0.30	19
				0.65	48	0.24	8
Bi ²¹⁴	19.9min		-	3.27	18	0.61	46
				1.54	18	1.77	16
				1.51	18	1.12	15
Po ²¹⁴	164 μs	7.69	100	-	-	-	-

Rn²²²는 반감기 3.82 일로 알파입자를 내면서 붕괴하여 폴로늄-218(Po²¹⁸)로 된다. Po²¹⁴는 반감기 23.3년인 납-214(Pb²¹⁴)로 붕괴하며, Pb²¹⁴는 안정된 Pb²⁰⁶까지 붕괴해 내려간다. 이들 중 Rn²²²가 주된 피폭원으로 작용하며 Po-210 까지 붕괴하는 동안 1.0 Bq 당 34,620 MeV의 잠재 알파에너지를 방출한다. 일반적으로, 라돈 0.03 Bq/g 이 포함된 토양은 1000 ~ 2000 Bq/m³ 의 라돈을 매일 대기 중으로 방출한다고 알려져 있다.⁷⁾ 이들은 호흡 시 폐에 누적 침적되어 폐조직에 손상을 주기도 한다. 이와 같이 폐조직이 지속적으로 손상되면 폐암을 유발시킬 수 있는 것이다.

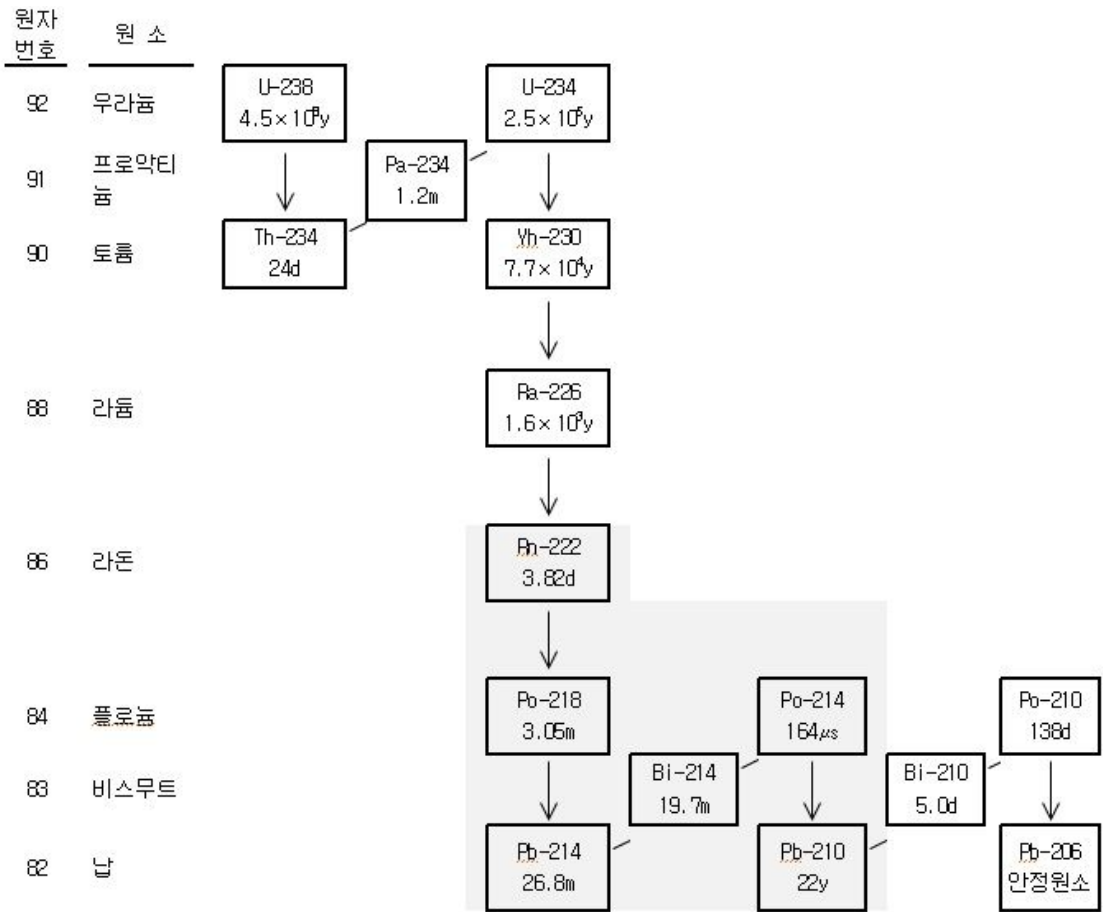


그림 2.1.1 우라늄(U^{238}) 붕괴도⁸⁾

Rn^{220} (토론)에 의해 제기되는 문제는 Rn^{222} (라돈)의 문제에 비해 범위가 좁고 다루기 용이하다. 토론에 대한 방호는 그 붕괴생성물인 반감기 10.6 시간의 Pb^{212} 흡입을 제어하는 것으로 충분하다.

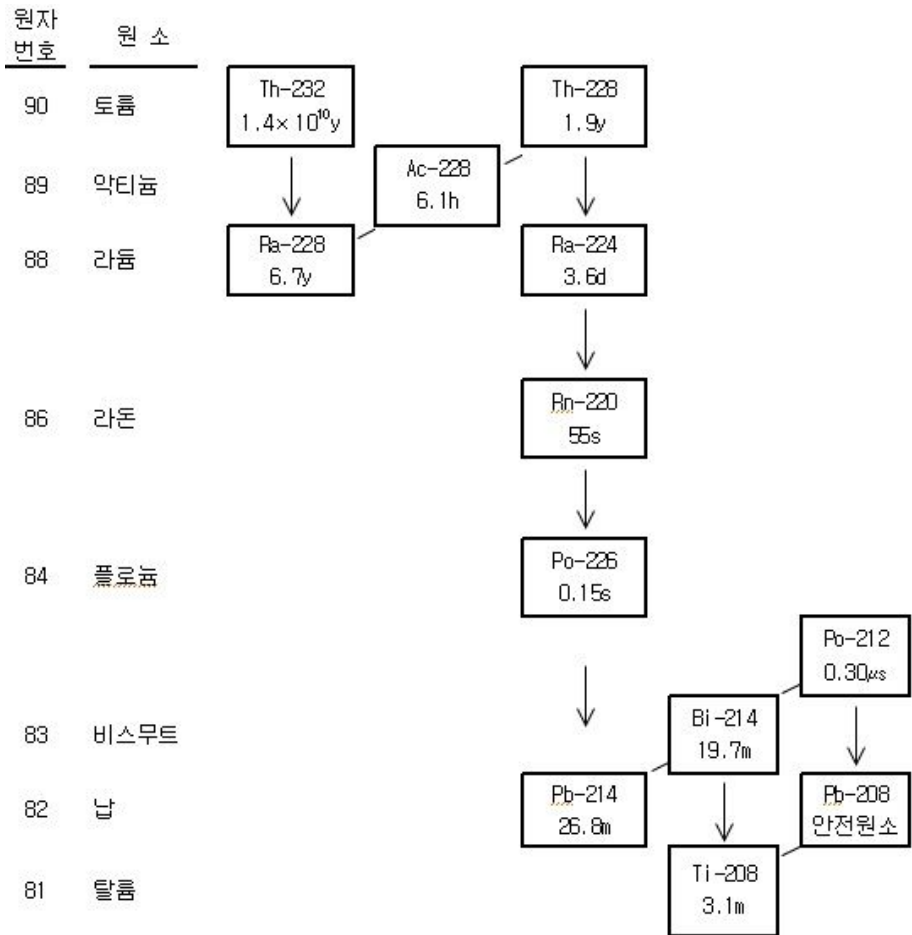


그림 2.1.2 토륨(Th²³²) 붕괴도⁸⁾

3. 라돈의 위해성

일반대중은 연간 약 2.4mSv의 피폭선량을 받는다. 이중 자신의 신체에서나 대지, 우주선에서 받는 피폭선량이 1.1mSv 정도이며 그 외에 라돈과 그 자핵종에 의한 피폭선량이 1.3mSv 정도다. 이러한 라돈피폭선량의 79%가 실내에서 라돈흡입에 의한 것으로 보고된다. 라돈과 딸핵종은 호흡시 호흡기 속으로 들어가 대부분 날숨에 의해 다시 나오지만 일부는 호흡기계에 잔존 흡착되어 붕괴를 한다. 이 과정에서 조직에 지속적인 손상으로 인한 폐암 발생을 일으킬 수 있는 것이다. 국제 암연구 기관(IARC)에서는 이러한 위험 때문에 1988년에 라돈을 인체 발암물질로 분류 하였으며, 전 세계 폐암의

3~14%가 라돈에 기인한다고 알려져 있다.

미국 EPA 보고서에 따르면 미국 내 라돈에 의한 사망은 약 21,000수준으로 음주운전 사망자보다 더 많으며 대기오염에 의한 사망자의 10배 수준이다.⁹⁾ 더군다나 오늘 날 사회에서는 주간에는 직장이라는 실내공간과 야간에는 가정이라는 실내공간에서 우리 생활 대부분이 이루어짐을 감안할 때 라돈의 위험은 더욱 증가될 것으로 보인다. EPA 에 ‘A Citizen's Guide to Radon’ 에 따르면 미국 규제치 4 pCi(148 Bq/m³)의 농도에서 지속적 생활시 흡연자의 경우 100명중 6.2명의 폐암 위험성을 경고 하고 있으며 이는 자동차사고의 5배이며 평균 실외 라돈농도 노출시 0.3명의 20배정도이다.¹⁰⁾¹¹⁾

표 2.1.2 RADON RISK IF YOU SMOKE¹⁰⁾

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)	

표 2.1.3 RADON RISK IF YOU VE NEVER SMOKED¹⁰⁾

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 그림 2.1.3과 같이 크게 토양층의 균열을 통해서 직접적으로 들어오거나 건축자재인 콘크리트 블록이나 방바닥 물질 등에서 유입이 된다. 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.⁶⁾

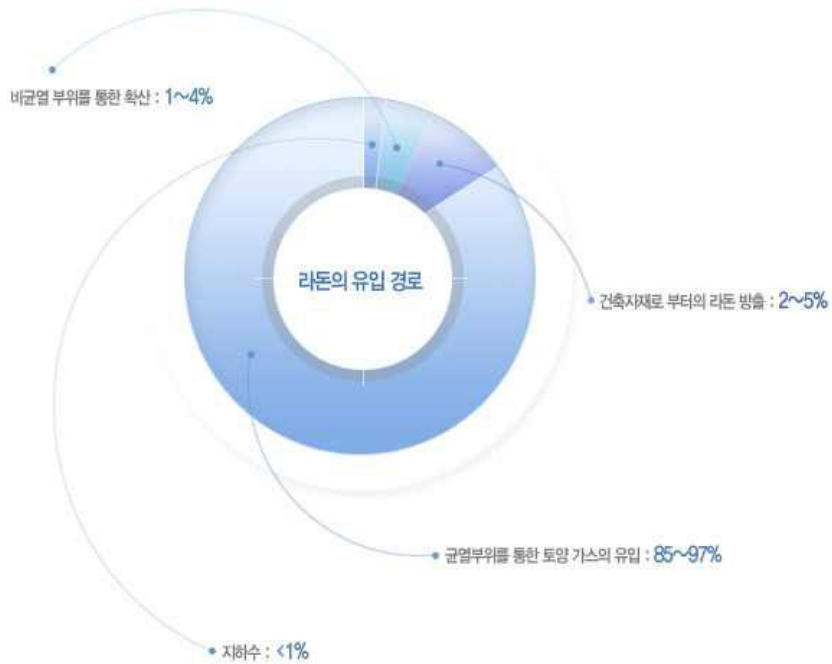


그림 2.1.3 라돈가스의 유입경로⁴⁾

이러한 실내로의 라돈가스 유입경로를 세분하여 보면 11가지의 경로로 요약해 볼 수가 있다.

- 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

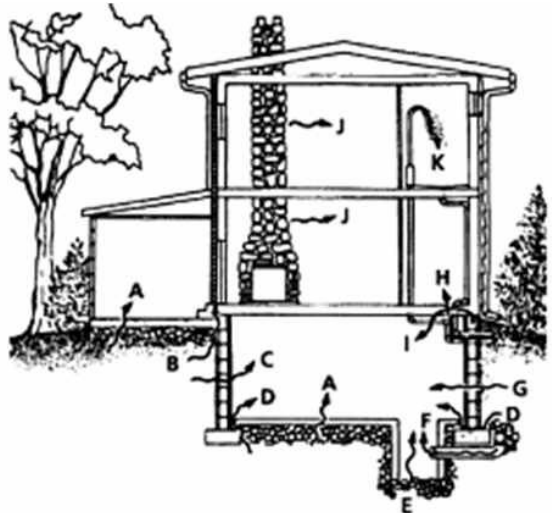


그림 2.1.4 라돈가스 실내유입경로¹²⁾

나. 인체에 대한 라돈의 영향

라돈 붕괴시 발생하는 알파선의 신체 내 비침은 40~70 μ m 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.

미국 EPA에서는 실내 라돈농도 권고치를 0.148 Bq/L(4pCi/L)를 권고하고 있으며 이 농도치는 일생동안 피폭시 폐암으로 사망할 위험율이 약 1 ~ 2%로 추정할 수 있는 수치이다.

라돈에 의한 인체 영향은 장기피폭에 의한 폐암 발생으로 나타나며, 이는 3가지 요인에 주로 좌우된다. 즉, 라돈농도가 높고 노출기간이 길며, 흡연습관이 있는 경우에는 폐암발생률이 증가한다. 2010년 폐암사망률은 10만 명당 45.7명으로 전체인구 4,875만 명으로 보면 한해 22,279명이 폐암으로 사망하는 것으로 계산되며 EPA자료인 10 ~ 15%로 계산시 약 2,230 ~ 3,340 명이 라돈에 의한 초과 폐암으로 사망하게 되는 것으로 볼 수 있다.¹⁰⁾¹³⁾

제 2 절 건축자재에서의 라돈농도측정

1. 측정 장비 및 방법

가. 라돈모니터



그림 2.2.1 SARAD의 RTM1688-2 라돈 모니터

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

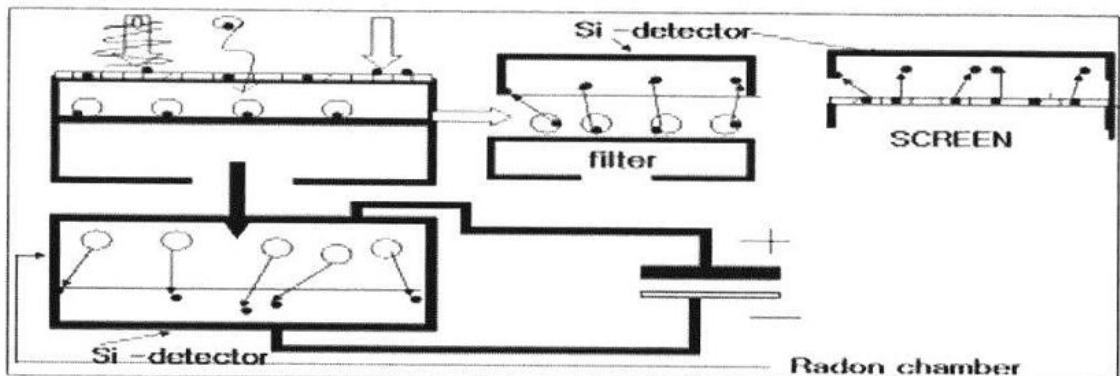


그림 2.2.2 RTM1688 측정시스템 개략도

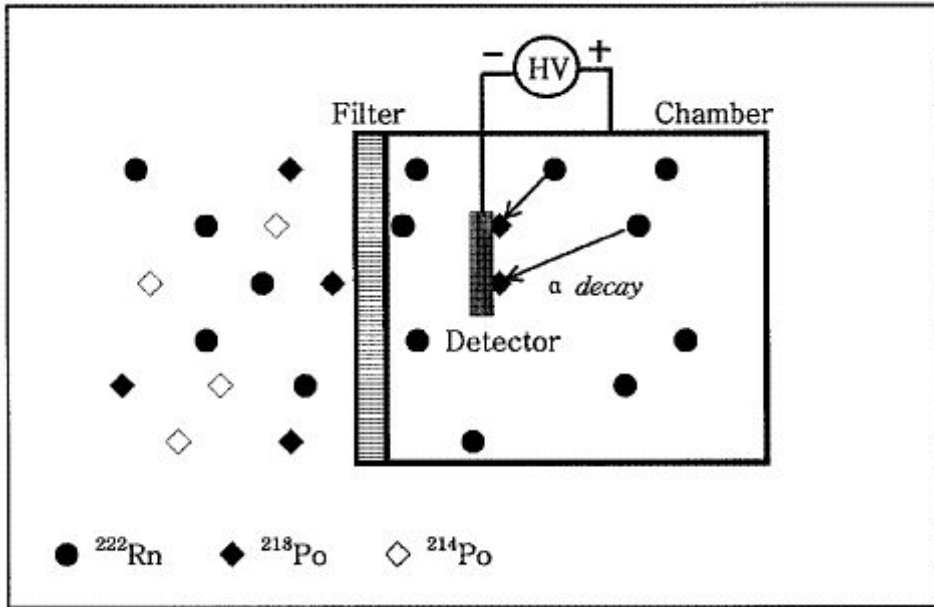


그림 2.2.3 Radon chamber operation

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.

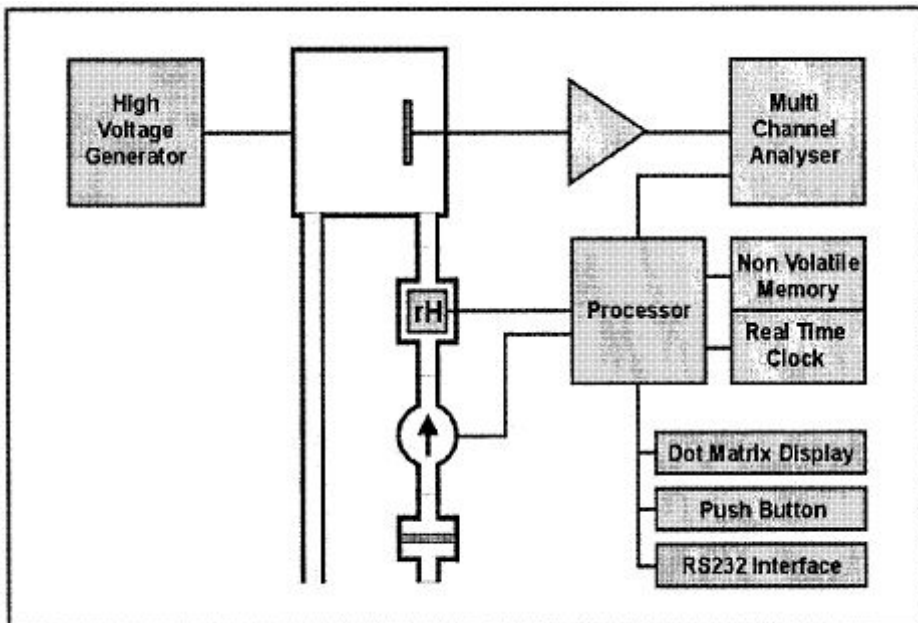


그림 2.2.4 RTM1688 Block diagram

이때 흡입된 공기 중에 존재하는 Rn²²²와 Rn²²⁰은 알파붕괴에 의해 이온성 물질인 Po²¹⁸과 Po²¹⁶이 증가하게 되며, 이들은 높은 전위차로 인해 검출기 표면에 포집되게 된다. 그러나 Po²¹⁸검출효율은 통계적으로 약 50%정도 측정이 이루어진다. 따라서 Po²¹⁸과 Po²¹⁶의 계측수를 파악하여 흡입된 공기 안에 포함된 Rn²²²와 Rn²²⁰의 농도를 측정하게 된다. 두 가지 요소에 의해서 Count의 증가는 라돈측정농도에 Po²¹⁴를 포함시킬 수 있다. 즉, 계측기에 포집된 Po²¹⁸의 붕괴계열에서 Po²¹⁴가 생성되면, Po²¹⁸ 카운트에 의해 Po²¹⁴ 카운트를 측정할 수 있다. 하지만 핵종 붕괴에 따른 딸핵종 생성시간이 오래 걸린다는 문제가 있다.

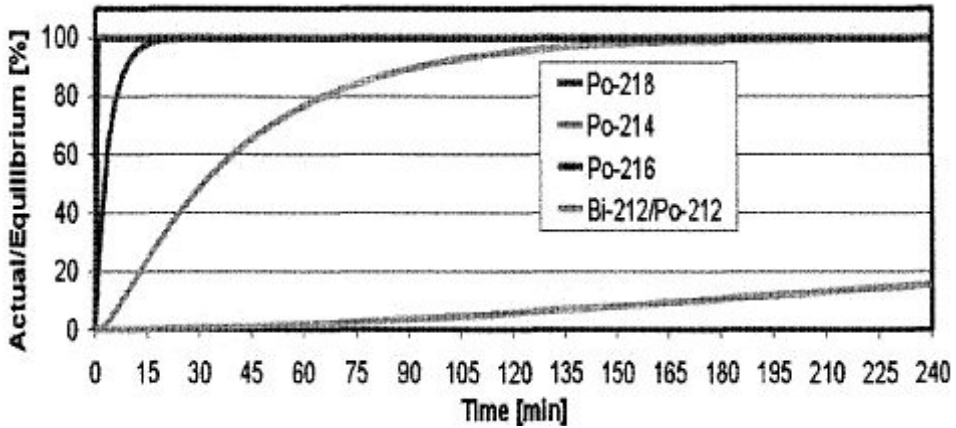


그림 2.2.5 Radon chamber step response

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 알파핵종

은 다음과 같다.

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

ROI 2 : Po^{218} or Bi^{212}

ROI 3 : Po^{216}

ROI 4 : Po^{214}

ROI 5 : Po^{212}

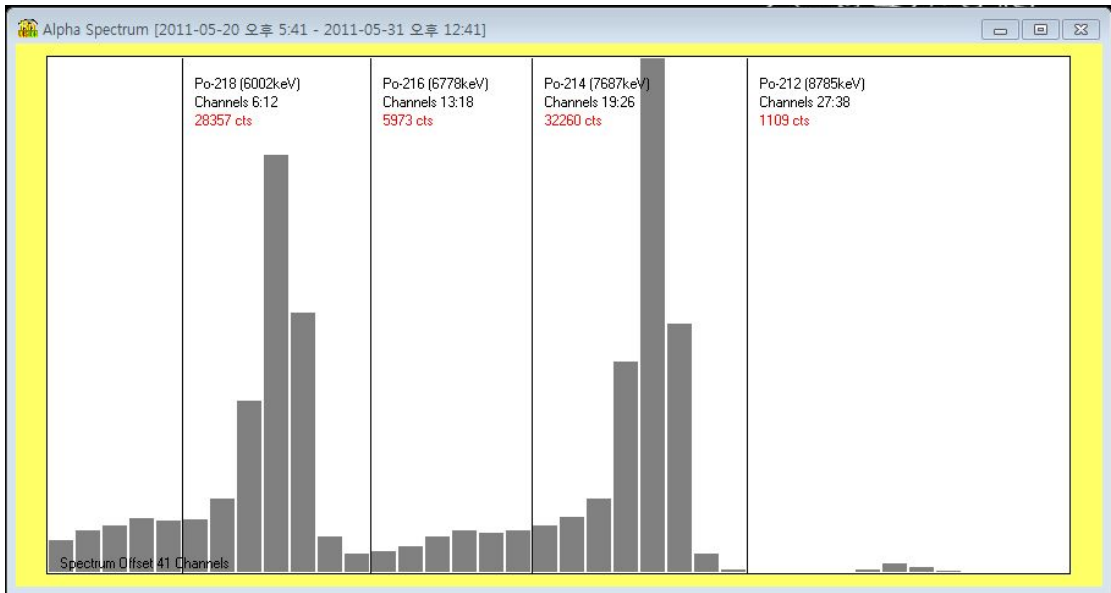


그림 2.2.6 Alpha Spectrum (시멘트계 텍스 측정)

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

Radon(Slow) : $1000 \cdot (ROI1 + ROI3) / (Time \cdot Sensitivity)$ (ROI1 : Rn218 ROI3: Rn214)

Error : $E[\%] = 100\% \cdot k \cdot \sqrt{N} / N$ ($k = \sigma$ $N = ROI1 + ROI3$)

Radon (Fast) : $1000 \cdot (ROI1) / (Time \cdot Sensitivity)$

Error : $E[\%] = 100\% \cdot k \cdot \sqrt{N} / N$ ($N = ROI1$)

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. ¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾

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

T : Intergration time(min)

C_{Rn} : Radon concentration(Bq/m³)

E : Efficiency of detection(cpm/kBq/m³) in dependence to the selected
calculation mode(fast or slow)

나. 실험용기

외부의 영향에서 단절시키고 통제가 가능하도록 5T 두께의 216ℓ 용량의 아크릴 박스를 2개를 제작하여 건축자재를 넣고 투명테이프를 이용하여 이음새 부분을 다시 마무리하였다.



그림 2.2.7 아크릴재 실험용기

다. 시료

시료는 광주시내 각 건축 상가에서 구입하였으며 종류로는 건축 및 실내 인테리어 자재로 흔히 쓰이는 재료로 하였다.

표 2.2.1 시료목록

순번	시료명	질량(g)	순번	시료명	질량(g)
1	텍스(시멘트계)	10266	6	황토타일(황토+숯)	9832.2
2	적벽돌	9631	7	타일(석고)	9979.9
3	에코카라트	9578	8	시멘트블럭	10457
4	시멘트벽돌	11006.6	9	고령토벽돌	10277.5
5	타일(점토+석회석)	19962.8	10	석고보드	5251.9

라. 실험

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$Ra - 226: 1.62 \times 10^3 y$$

$$Rn - 222: 3.8235d$$

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

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

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

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

$$= 65.9124 \text{ day}$$

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.

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

이 식을 통하여 Ra²²⁶ 대비 Rn²²² 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 그림 2.2.8에 나타내었다.

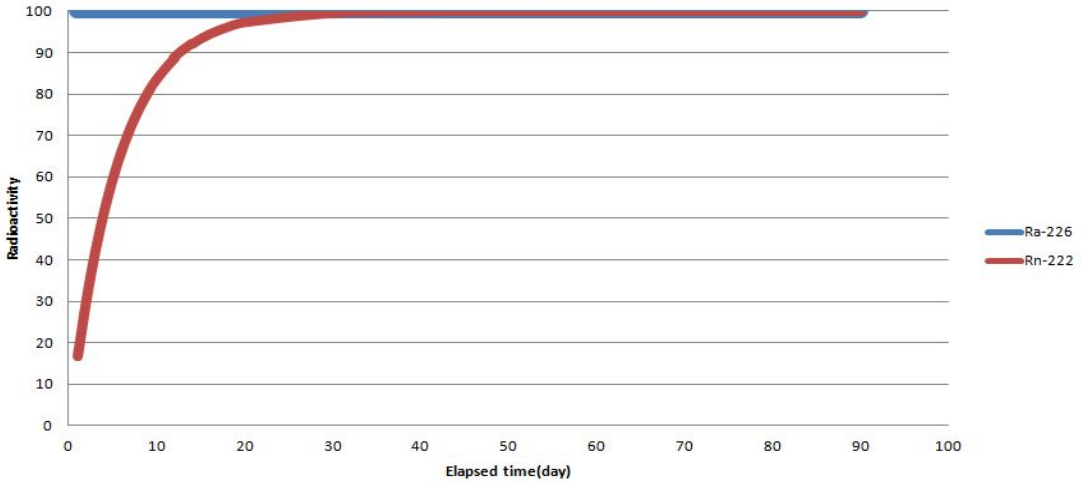


그림 2.2.8 모핵종 Ra²²⁶에서 자핵종 Rn²²²로의 붕괴 및 Build-up 기간

각 시료는 실험장치내 최대한 서로 겹치는 면이 없도록 하였으며 60분 동안 측정된 기록을 1회씩 결과 출력하도록 하였다. 측정기록은 시료 밀봉 후 91시간부터 100시간 까지 10시간동안 라돈/토론 농도를 기록 하였다. 측정기의 위치선정은 다음과 같은 사항을 고려하였다.

- (1) 측정기가 주변의 환경에 의해 방해를 받지 말아야 한다.
- (2) 측정기가 가열, 환기, 냉방을 위한 환기, 문, 팬, 창문 등에 의해 영향을 받으면 안 된다.
- (3) 측정기는 햇빛이 비치거나 습도가 높은 곳에 설치하지 않는다.
- (4) 측정지점은 창으로부터 90cm 이상 이격시켜야 한다.
- (5) 측정기는 바닥에서 최소 50cm 이상, 다른 실내의 대상물체부터 10cm 이상을 이격시켜야 한다.¹⁸⁾



그림 2.2.9 실험시기와 시료를 이용한 실험장면

또한 라돈 방출률 결과를 토대로 하여 측정치의 특이 결과가 있는 시료의 경우 HPGe를 통한 감마시료분석을 하여 내부 천연핵종 분포를 파악해 보았다.

마. 측정프로그램

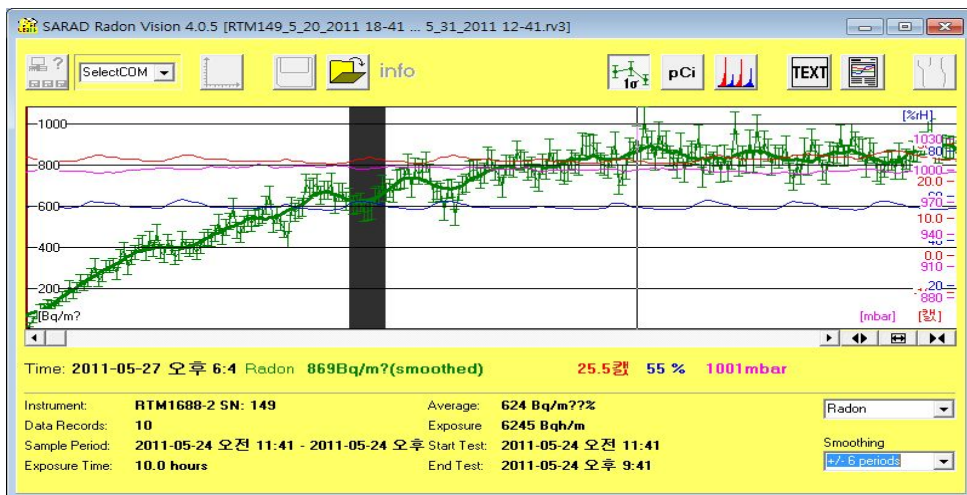


그림 2.2.10 RTM1688-2 계측기 프로그램 Radon Vision4

측정프로그램으로는 RADON VISION4를 사용하여 측정을 하였으며 계측기 세팅으로는 Pump Mode는 Continuous, Radon Mode는 Fast Mode를 사용 하였으며, 60분 계측에 따른 신뢰구간을 95%로 사용하였다. 이에 따른 검출기의 검출한도는¹⁴⁾

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

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

2. 공기 중 라돈농도 실험결과

가. 텍스(시멘트계)

본 실험에 사용된 아미텍스는 시멘트계 텍스로써 석고, 시멘트 등의 무기재료를 주 원료로 하여 초조성형한 분연천장판으로서 건축 시공시 천장 마감재로 많이 쓰이고 있다. 개당 약 1280g의 질량을 가지고 있으며 60 X 30 X 0.6cm 크기이며 1m² 시공시 약 5.5장이 소요된다.(3.3m³시 18장)

2011.05.20 17:41분부터 측정을 시작하여 2011.05.24 11:41 ~ 21:41 시간의 측정 데이터를 사용 하였다.

표 2.2.2 시료(시멘트계-텍스) 질량

번호	질량(g)	번호	질량(g)
1	1307	5	1289
2	1281	6	1286
3	1274	7	1272
4	1287	8	1270
합계	10,266 g		



그림 2.2.11 시료(시멘트계-텍스) 사진

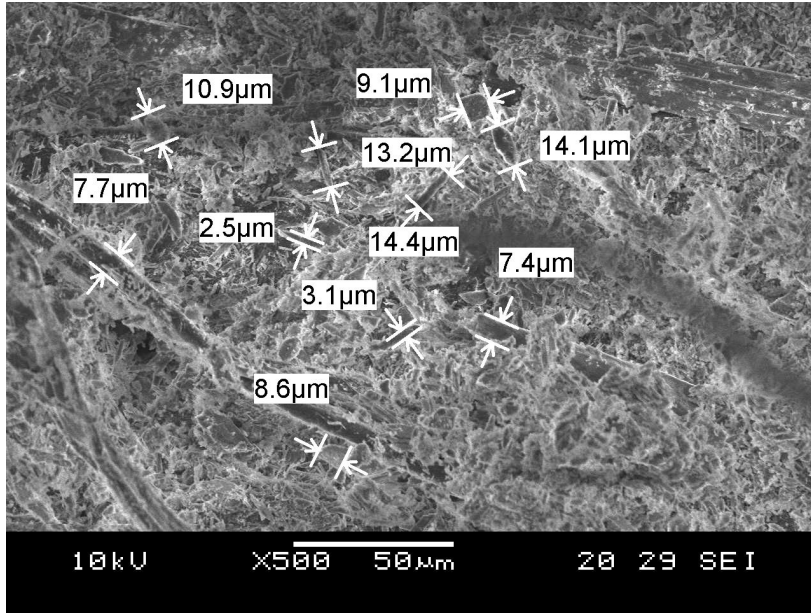


그림 2.2.12 시료(시멘트계-텍스) 전자주사현미경 500 배율 사진

측정결과

(1) BKG

표 2.2.3. 시료(시멘트계-텍스) 시험시 공시료 측정치

측정 차수	온도 ($^{\circ}\text{C}$)	습도 (%)	압력 (mbar)	측정치(Bq/m^3)		
				라돈	라돈(Fast)	토론
91(5/24 12:41)	26.0	53	1003	0	30	6
92	26.0	53	1002	9	6	4
93	26.5	53	1001	6	8	11
94	26.5	53	1001	3	21	1
95	26.5	53	1002	11	16	6
96	26.5	53	1002	17	24	4
97	26.5	53	1002	10	16	4
98	26.0	53	1003	3	11	1
99	26.0	53	1004	15	15	5
100(5/24 21:41)	25.5	53	1004	9	12	3
평균	26.20	53.00	1,002.40	8.30	15.90	4.50

(2) 시료(텍스)

표 2.2.4. 시료(시멘트계-텍스) 측정치

측정 차수	온도 (℃)	습도 (%)	압력 (mbar)	측정치(Bq/m ³)		
				라돈	라돈(Fast)	토론
91(5/24 12:41)	25.5	57	1003	608	518	34
92	26.0	58	1002	609	598	32
93	26.0	58	1001	621	613	32
94	26.0	58	1001	572	414	35
95	26.5	57	1002	578	578	41
96	26.5	57	1002	580	498	33
97	26.0	57	1002	646	743	30
98	26.0	56	1002	654	616	34
99	26.0	56	1003	710	661	35
100(5/24 21:41)	25.5	56	1004	670	636	74
평균	26.00	57.00	1,002.20	624.80	587.50	38.00

나. 적벽돌

본 실험에 사용된 적벽돌은 4~7%의 철분이 함유된 점토를 산화소성방식으로 제조한 벽돌로 주로 주택의 외관 마감재나 화단 조성 등에 사용되고 있다. 개당 평균 1280g의 질량을 가지고 있으며 19 X 9 X 5.5cm 크기이며 1m² 시공시 약 75장이 소요된다.(3.3m³시 250장)

2011.05.31 20:46분부터 측정을 시작하여 2011.06.04 13:46 ~ 23:46 시간의 측정 데이터를 사용 하였다.

표 2.2.5 시료(적벽돌) 질량

번호	질량(g)	번호	질량(g)
1	1,594	5	1,603
2	1,617	7	1,602
4	1,608	10	1,607
합계	9,631		



그림 2.2.13 시료(적벽돌) 사진

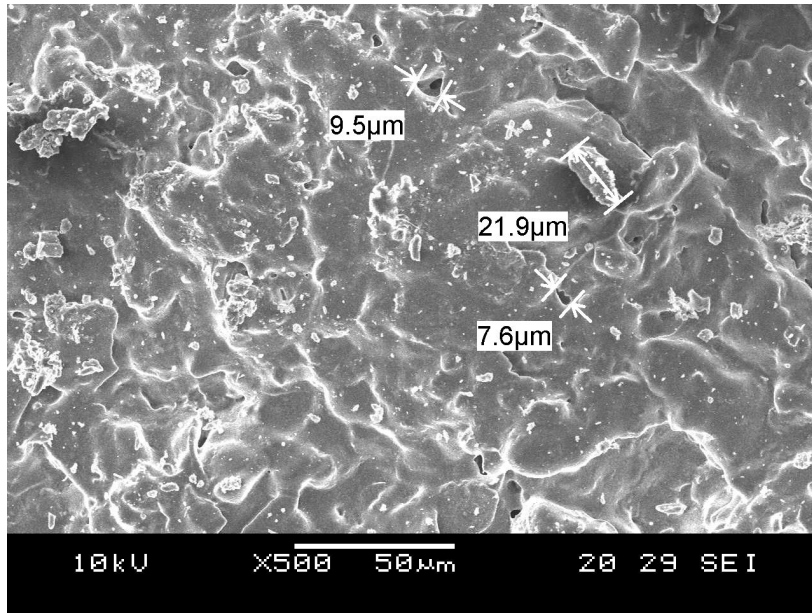


그림 2.2.14 시료(적벽돌) 사진 전자주사현미경 500 배율 사진

측정결과

(1) BKG

표 2.2.6 시료(적벽돌) 시험시 공시료 측정치

측정 차수	온도 (℃)	습도 (%)	압력 (mbar)	측정치(Bq/m ³)		
				라돈	라돈(Fast)	토론
91(6/4 14:46)	28.0	46	998	9	6	4
92	28.5	46	997	4	16	1
93	28.5	46	997	6	6	3
94	28.0	46	997	6	0	4
95	28.0	46	998	3	6	0
96	28.0	46	998	3	11	1
97	27.5	46	998	3	11	1
98	27.5	47	999	0	0	0
99	27.5	47	999	6	6	3
100(6/4 23:46)	27.0	47	998	6	6	3
평균	27.85	46.30	997.90	4.60	6.80	2.00

(2) 시료(적벽돌)

표 2.2.7 시료(적벽돌) 측정치

측정 차수	온도 (℃)	습도 (%)	압력 (mbar)	측정치(Bq/m ³)		
				라돈	라돈(Fast)	토론
91(6/4 14:46)	28.0	43	997	0	8	12
92	28.0	43	997	3	0	3
93	28.0	43	997	9	12	3
94	28.0	43	997	3	15	1
95	28.0	43	997	15	24	3
96	28.0	43	998	6	6	3
97	27.5	43	998	5	11	4
98	27.5	43	998	2	11	1
99	27.5	43	998	4	20	11
100(6/4 23:46)	27.5	43	998	6	6	3
평균	27.80	43.00	997.50	5.30	11.30	4.40

다. 에코카라트

에코카라트는 벽지대용 내장타일로 사용되거나 아트 월에 많이 사용되는 주거공간 자재로 화산재로부터 추출해낸 알로펜을 주성분으로 세라믹화 하여 제조한 내장재이다. 개당 평균 870g의 질량을 가지고 있으며 30 X 30 X 0.5cm 크기이며 1m² 시공시 약 11장이 소요된다.(3.3m³시 36장)

2011.06.07 16:02분부터 측정을 시작하여 2011.06.11 10:03 ~ 20:03 시간의 측정 데이터를 사용 하였다.

표 2.2.8 시료(에코카라트) 질량

번호	질량(g)	번호	질량(g)
1	861.6	7	878.0
2	864.6	8	866.5
3	864.8	9	880.6
4	866.9	10	876.2
5	871.0	11	888.6
6	859.2		
합계	9,578 g		

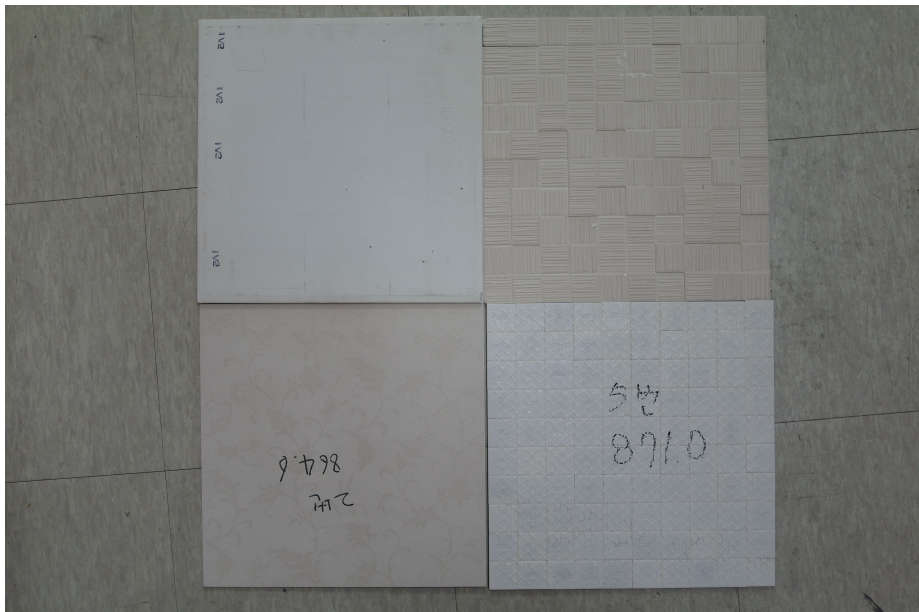


그림 2.2.15 시료(에코카라트) 사진

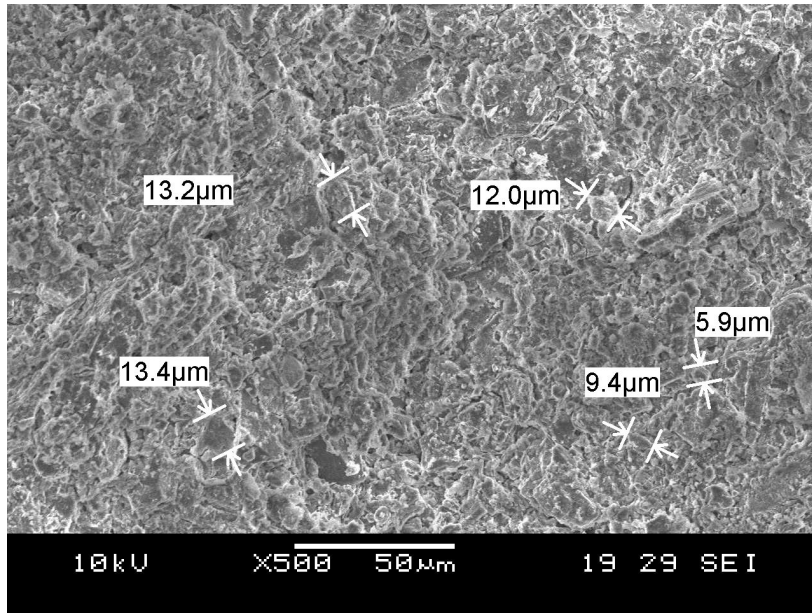


그림 2.2.16 시료(에코카라트) 전자주사현미경 500 배율 사진

측정결과

(1) BKG

표 2.2.9 시료(에코카라트) 질량 시험시 공시료 측정치

측정 차수	온도 (℃)	습도 (%)	압력 (mbar)	측정치(Bq/m ³)		
				라돈	라돈(Fast)	토론
91(6/11 11:03)	28.0	45	993	0	0	6
92	28.5	45	993	3	11	1
93	28.5	45	993	4	16	1
94	29.0	44	993	0	18	6
95	29.0	44	992	9	6	4
96	29.5	44	992	0	12	6
97	29.5	44	993	6	10	17
98	29.0	44	993	3	0	3
99	29.0	45	993	0	0	6
100(6/11 20:03)	28.5	45	994	0	12	6
평균	28.85	44.50	992.90	2.50	8.50	5.60

(2) 시료(에코카라트)

표 2.2.10 시료(에코카라트) 질량 측정치

측정 차수	온도 (℃)	습도 (%)	압력 (mbar)	측정치(Bq/m ³)		
				라돈	라돈(Fast)	토론
91(6/11 11:03)	28.0	48	993	48	61	40
92	28.0	49	993	92	110	46
93	28.5	49	992	26	47	48
94	28.5	49	992	53	56	70
95	29.0	49	992	43	53	48
96	29.0	48	992	73	86	36
97	29.0	48	992	44	56	35
98	29.0	47	992	92	84	28
99	29.0	47	993	61	62	22
100(6/11 20:03)	28.5	47	994	53	57	109
평균	28.65	48.10	992.50	58.50	67.20	48.20

라. 시멘트벽돌

주택 시공시에 구조체나 벽재로 사용되는 시멘트벽돌은 모래와 자갈과 시멘트를 이용하여 압축 성형하여 건조한 자재로써 18344g의 평균질량을 지니고 있으며 19 X 9 X 5.5cm 크기이며 1m² 시공시 약 75장이 소요된다.(3.3m³시 250장)

2011.06.13 18:13분부터 측정을 시작하여 2011.06.17 12:13 ~ 22:13 시간의 측정 데이터를 사용 하였다.

표 2.2.11 시료(시멘트벽돌) 질량

번호	질량(g)	번호	질량(g)
1	18393	4	19406
2	17901	5	17948
3	18021	6	18397
합계	110,066		



그림 2.2.17 시료(시멘트벽돌) 사진

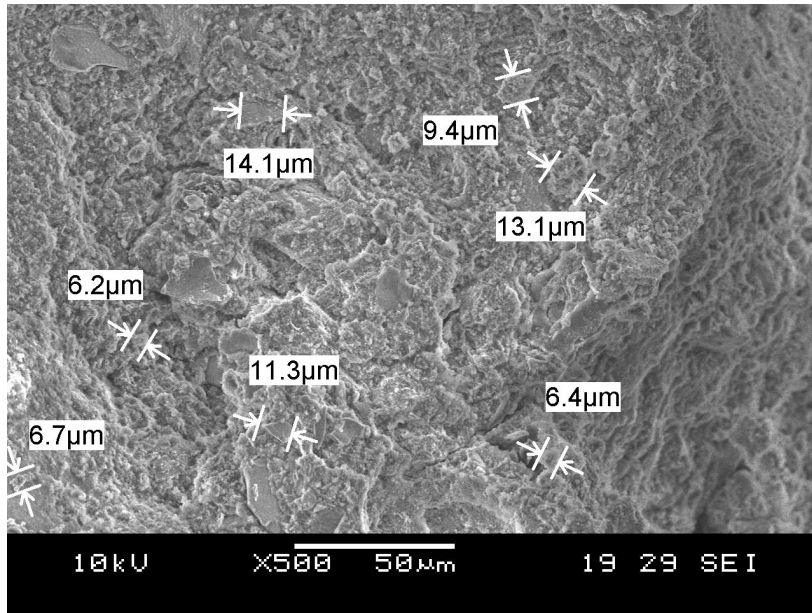


그림 2.2.18 시료(시멘트벽돌) 전자주사현미경 500 배율 사진

측정결과

(1) BKG

표 2.2.12 시료(시멘트벽돌) 시험시 공시료 측정치

측정차수	온도 (°C)	습도 (%)	압력 (mbar)	측정치(Bq/m ³)		
				라돈	라돈(Fast)	토론
91(06/17 13:13)	29.5	44	998	10	16	4
92	29.0	44	998	3	6	0
93	29.0	44	998	3	14	12
94	29.0	44	998	3	0	3
95	29.0	45	998	0	0	0
96	29.0	45	998	3	6	0
97	28.5	45	998	3	11	1
98	28.5	45	998	9	6	4
99	28.5	45	998	0	6	6
100(06/17 22:13)	28.5	45	998	3	11	1
평균	28.85	44.60	998.00	3.70	7.60	3.10

(2) 시료(시멘트벽돌)

표 2.2.13 시료(시멘트벽돌) 측정치

측정차수	온도 (℃)	습도 (%)	압력 (mbar)	측정치(Bq/m ³)		
				라돈	라돈(Fast)	토론
91(06/17 13:13)	29.5	72	998	130	130	15
92	29.0	72	998	118	101	37
93	29.0	72	998	105	74	15
94	29.0	72	997	100	76	14
95	29.0	72	997	100	64	15
96	29.0	72	997	147	124	17
97	29.0	71	997	153	118	18
98	28.5	71	998	180	154	18
99	28.5	71	997	138	94	17
100(06/17 22:13)	28.5	71	998	134	127	15
평균	28.90	71.60	997.50	130.50	106.20	18.10

마. 타일(점도+석회석)

바닥이나 벽 등의 표면장식에 사용되는 점토와 석회석을 이용하여 소성한 제품으로 시공이 간단하고 균열이나 변색이 없는 등 내구성이 좋아 많이 사용되고 있는 건축자재이다. 개당 평균 2852g의 질량을 가지고 있으며 40 X 40 X 0.6cm 크기이며 1m² 시공 시 약 6장이 소요된다.(3.3m³시 21장)

2011.06.19 16:12분부터 측정을 시작하여 2011.06.23 10:12 ~ 20:12 시간의 측정 데이터를 사용 하였다.

표 2.2.14 시료(타일) 질량

번호	질량(g)	번호	질량(g)
2	2845	8	2837.4
4	2855	9	2847
5	2860	10	2888.4
6	2830		
합계	19,962.8		



그림 2.2.19 시료(타일) 사진

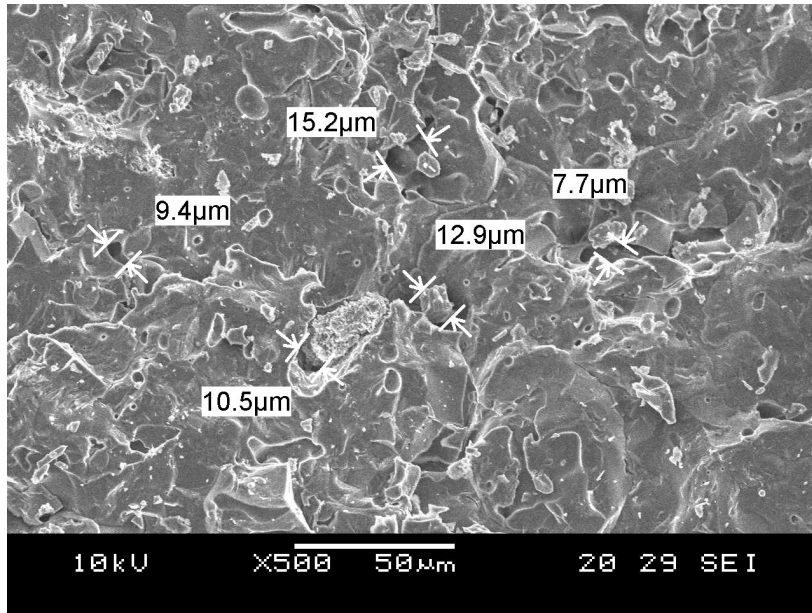


그림 2.2.20 시료(타일) 전자주사현미경 500 배율 사진

측정결과

(1) BKG

표 2.2.15 시료(타일) 시험시 공시료 측정치

측정 차수	온도 ($^{\circ}\text{C}$)	습도 (%)	압력 (mbar)	측정치(Bq/m^3)		
				라돈	라돈(Fast)	토론
91(6/23 11:12)	28	46	993	4	16	1
92	28.5	45	993	3	11	1
93	29.0	45	992	0	0	0
94	29.5	44	991	0	0	0
95	30.0	45	991	6	12	0
96	30.0	45	991	10	11	4
97	29.5	45	991	4	16	1
98	29.5	45	991	3	0	3
99	29.0	45	991	3	6	0
100(6/23 20:12)	29.0	46	992	3	11	1
평균	29.20	45.10	991.60	3.60	8.30	1.10

(2) 시료(타일)

표 2.2.16 시료(타일) 측정치

측정 차수	온도 (℃)	습도 (%)	압력 (mbar)	측정치(Bq/m ³)		
				라돈	라돈(Fast)	토론
91(6/23 11:12)	28.0	57	992	5	11	4
92	28.5	57	992	15	12	5
93	29.0	57	991	12	18	3
94	29.5	57	991	0	0	0
95	29.5	56	991	3	17	11
96	30.0	56	991	3	6	0
97	29.5	56	991	5	11	4
98	29.5	56	991	2	15	1
99	29.5	56	991	10	15	4
100(6/23 20:12)	29.0	56	991	9	12	3
평균	29.20	56.40	991.20	6.40	11.70	3.50

바. 황토타일(황토+숯)

본 실험에 사용한 황토 타일은 내부 층에는 숯이 들어 있고 외부는 황토로 초벌구이 가된 타일형태의 제품으로써 한옥주택에 벽면이나 바닥의 재료로 사용되거나 일반주택의 아트홀로도 사용되고 있다. 개당 평균 1404.6g의 질량을 가지고 있으며 34 X 24 X 1cm 크기이며 1m² 시공시 약 12장이 소요된다.(3.3m³시 40장)

2011.06.24 10:00분부터 측정을 시작하여 2011.06.28 04:00 ~ 14:00 시간의 측정 데이터를 사용 하였다.

표 2.2.17 시료(황토타일) 질량

번호	질량(g)	번호	질량(g)
1	1,403.2	6	1,403.5
3	1,406.5	8	1,406.6
4	1,404	9	1,408.4
5	1,400		
합계	9,832.2		



그림 2.2.21 시료(황토타일) 사진

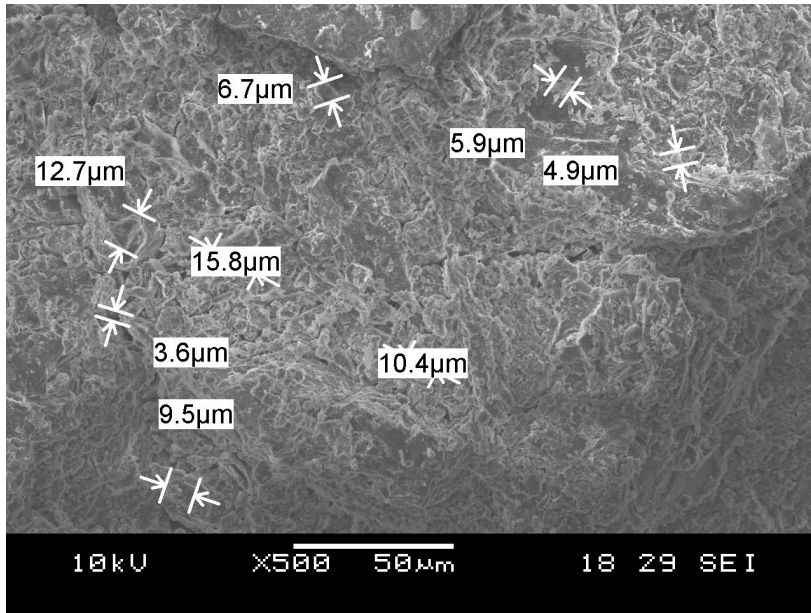


그림 2.2.22 시료(황토타일) 전자주사현미경 500배율 사진

측정결과

1. BKG

표 2.2.18 시료(황토타일) 시험시 공시료 측정치

측정 차수	온도 (°C)	습도 (%)	압력 (mbar)	측정치(Bq/m ³)		
				라돈	라돈(Fast)	토론
91(6/28 05:00)	27.5	48	998	3	11	1
92	27.0	48	999	3	6	0
93	27.5	47	999	0	0	6
94	27.5	47	999	3	11	1
95	28.0	47	1000	3	11	1
96	28.0	46	1000	3	0	3
97	28.5	46	1000	0	12	6
98	28.5	46	999	0	0	0
99	29.0	46	999	3	0	3
100(6/28 14:00)	29.5	45	998	3	0	3
평균	28.10	46.60	999.10	2.10	5.10	2.40

2. 시료(황토타일)

표 2.2.19 시료(황토타일) 측정치

측정 차수	온도 (℃)	습도 (%)	압력 (mbar)	측정치(Bq/m ³)		
				라돈	라돈(Fast)	토론
91(6/28 05:00)	27.5	61	998	26	38	44
92	27.5	61	998	30	60	24
93	27.5	61	998	66	53	41
94	27.5	61	999	35	46	13
95	28.0	62	999	9	39	27
96	28.0	63	999	49	49	45
97	28.5	64	999	45	60	18
98	28.5	64	999	30	70	53
99	29.0	65	998	30	42	36
100(6/28 14:00)	29.5	64	998	12	39	38
평균	28.15	62.60	998.50	33.20	49.60	33.90

사. 타일(석고)

인테리어소품으로 실내아트홀등 표면장식용으로 많이 쓰이는 자재로써 황산칼슘이 주된 성분으로 구성되어 있다. 개당 평균 1,425g의 질량을 가지고 있으며 30 X 30 X 1.5cm 크기이며 1m² 시공시 약 11장이 소요된다.(3.3m³시 33장)

2011.06.29 09:52분부터 측정을 시작하여 2011.07.03 03:52 ~ 13:52 시간의 측정 데이터를 사용 하였다.

표 2.2.20 시료(석고타일) 질량

번호	질량(g)	번호	질량(g)
2	1,586	7	1,588.3
4	1,600	9	1,519.8
5	946.3	10	1,130.7
6	1,608.8		
합계	9,979.9		

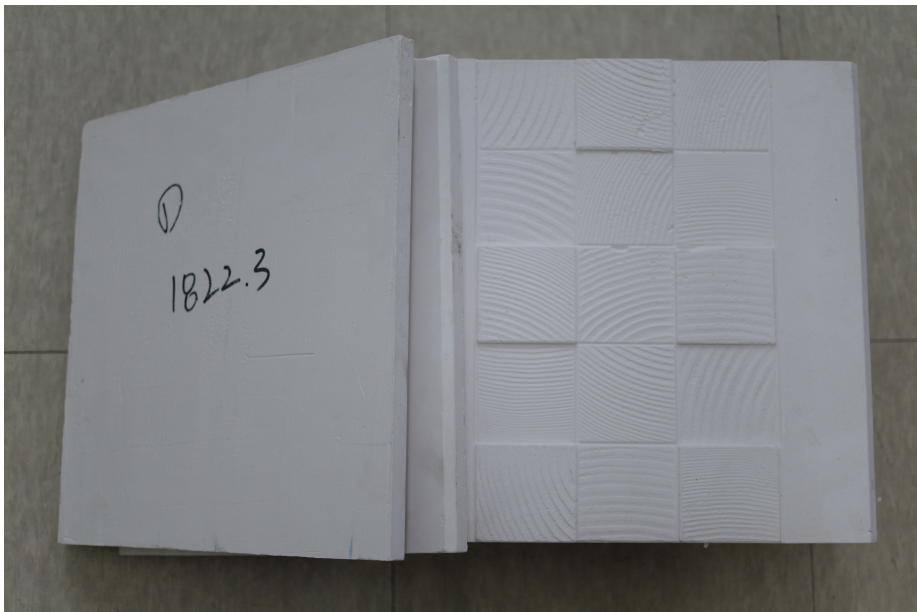


그림 2.2.23 시료(석고타일) 사진

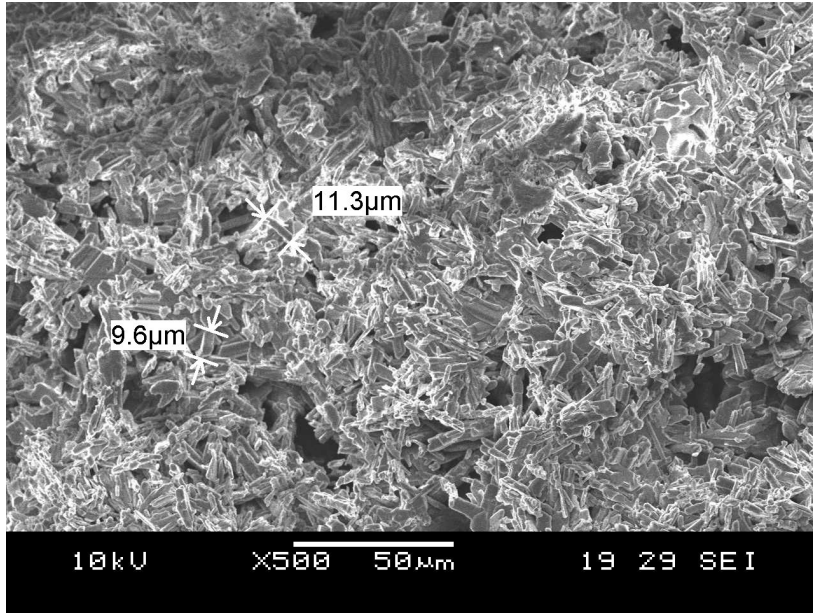


그림 2.2.24 시료(석고타일) 전자주사현미경 500 배율 사진

측정결과

(1) BKG

표 2.2.21 시료(석고타일) 시험시 공시료 측정치

측정 차수	온도 (°C)	습도 (%)	압력 (mbar)	측정치(Bq/m ³)		
				라돈	라돈(Fast)	토론
91(7/3 04:52)	29.5	47	990	3	0	3
92	29.5	47	990	0	0	6
93	29.5	47	990	0	0	0
94	29.5	47	990	6	12	0
95	29.5	47	990	3	15	1
96	29.5	47	990	3	0	3
97	29.5	47	990	0	0	6
98	29.5	47	990	3	6	0
99	30.0	47	989	0	8	12
100(7/3 13:52)	30.0	46	989	0	0	0
평균	29.60	46.90	989.80	1.80	4.10	3.10

(2) 시료(타일)

표 2.2.22 시료(석고타일) 측정치

측정 차수	온도 (°C)	습도 (%)	압력 (mbar)	측정치(Bq/m ³)		
				라돈	라돈(Fast)	토론
91(7/3 04:52)	30.0	61	990	8	15	5
92	30.0	61	989	0	18	6
93	30.0	61	989	5	11	4
94	30.0	61	989	6	8	11
95	30.0	61	989	5	11	4
96	30.0	60	989	2	11	1
97	30.0	60	989	6	0	4
98	30.0	60	989	6	8	11
99	30.0	60	988	3	17	11
100(7/3 13:52)	30.5	60	988	0	6	6
평균	30.05	60.50	988.90	4.10	10.50	6.30

아. 시멘트블럭

주택 시공시에 구조체나 벽재로 사용 되는 시멘트블럭은 모래와 자갈과 시멘트를 이용하여 압축 성형하여 제조한 자재로써 10,038g의 평균질량을 지니고 있으며 39 X 19 X 10cm 크기이며 1m² 시공시 약 13.5장이 소요된다.(3.3m³시 44.5장)

2011.07.04 17:41분부터 측정을 시작하여 2011.07.08 11:41 ~ 21:41 시간의 측정 데이터를 사용 하였다.

표 2.2.23 시료(시멘트블럭) 질량

번호	질량(g)
2	10457
합계	10457



그림 2.2.25 시료(시멘트블럭) 사진

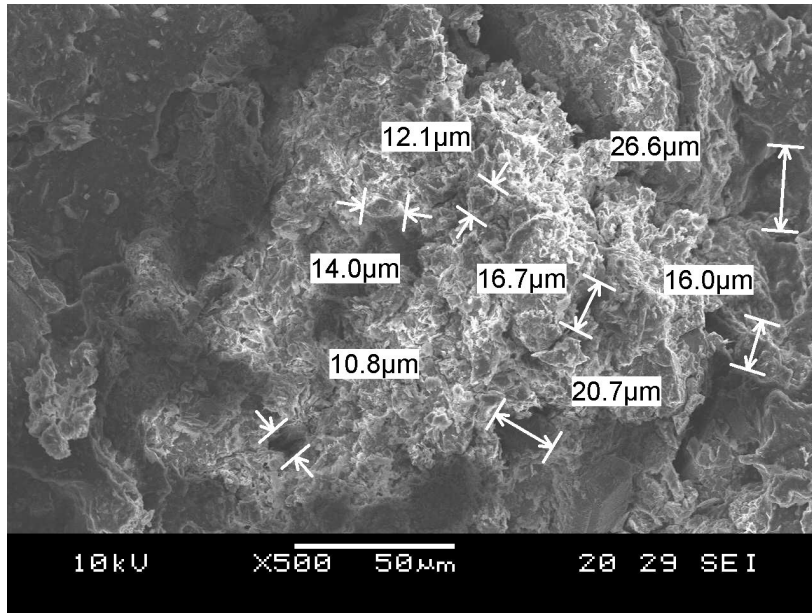


그림 2.2.26 시료(시멘트블럭) 전자주사현미경 500배율 사진

측정결과

(1) BKG

표 2.2.24 시료(시멘트블럭) 시험시 공시료 측정치

측정 차수	온도 (°C)	습도 (%)	압력 (mbar)	측정치(Bq/m ³)		
				라돈	라돈(Fast)	토론
91(7/8 12:41)	28.5	48	995	4	16	1
92	28.5	48	994	3	6	0
93	29.0	47	994	0	0	6
94	29.0	47	994	0	0	0
95	29.5	47	994	0	6	6
96	29.5	47	994	0	0	0
97	29.5	47	994	3	11	1
98	29.0	48	995	3	11	1
99	29.0	48	995	3	11	1
100(7/8 21:41)	29.0	48	996	3	11	1
평균	29.05	47.50	994.50	1.90	7.20	1.70

(2) 시료(시멘트블럭)

표 2.2.25 시료(시멘트블럭) 측정치

측정차수	온도 (°C)	습도 (%)	압력 (mbar)	측정치(Bq/m ³)		
				라돈	라돈(Fast)	토론
91(7/8 12:41)	28.5	65	994	147	118	17
92	28.5	65	994	156	193	14
93	29.0	65	994	144	104	19
94	29.0	65	993	146	151	15
95	29.5	65	993	145	101	18
96	29.5	65	993	112	110	14
97	29.5	65	994	147	145	16
98	29.0	65	994	165	142	18
99	29.0	66	994	140	119	16
100(7/8 21:41)	29.0	66	995	166	160	17
평균	29.05	65.20	993.80	146.80	134.30	16.40

자. 고령토벽돌

본 실험에 사용된 고령토벽돌은 4% 미만의 철분을 함유한 고령토 및 백토를 산화소성방식으로 생산한 벽돌로 겉면이 약간거치며 핑크색, 연분홍색등이 띈다. 개당 평균 1285g의 질량을 가지고 있으며 19 X 9 X 5.5cm 크기이며 1m² 시공시 약 75장이 소요된다.(3.3m³시 250장)

2011.07.11 14:55분부터 측정을 시작하여 2011.07.15 08:55 ~ 18:55 시간의 측정 데이터를 사용 하였다.

표 2.2.26 시료(고령토벽돌) 질량

번호	질량(g)	번호	질량(g)
1	1282.1	6	1284.2
2	1283.1	7	1295.5
4	1295.7	9	1275.7
5	1274.1	10	1287.1
합계	10,227.5 g		

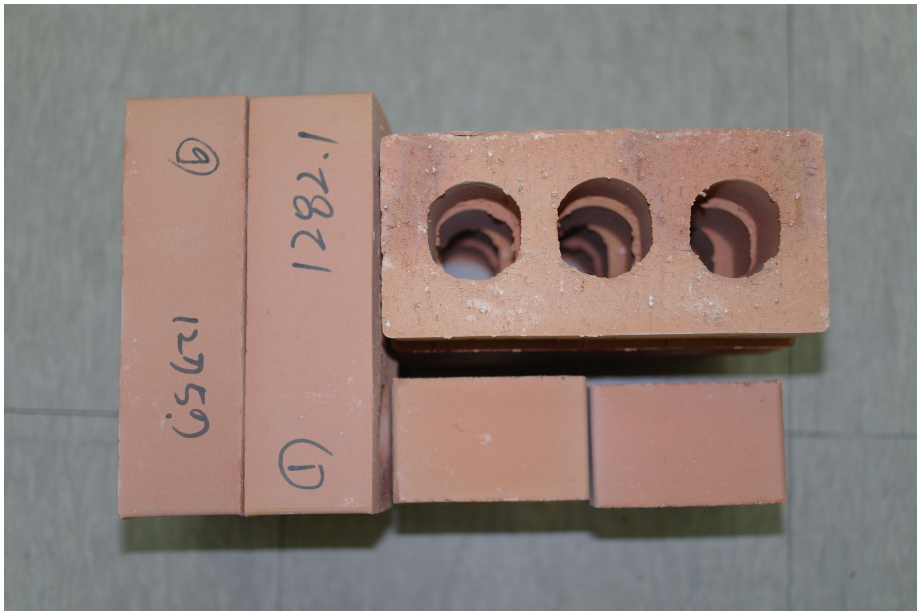


그림 2.2.27 시료(고령토벽돌) 사진

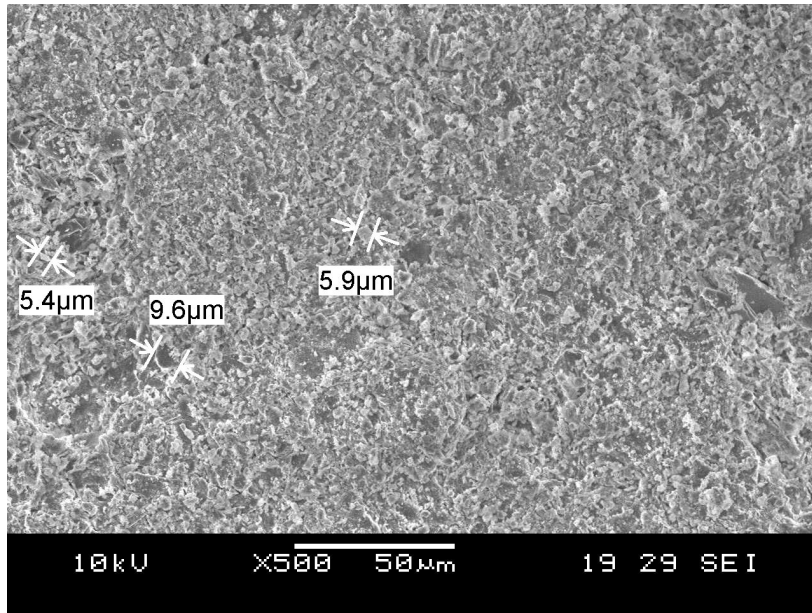


그림 2.2.28 시료(고령토벽돌) 전자주사현미경 500 배율 사진

측정결과

(1) BKG

표 2.2.27 시료(고령토벽돌) 시험시 공시료 측정치

측정 차수	온도 (°C)	습도 (%)	압력 (mbar)	측정치(Bq/m ³)		
				라돈	라돈(Fast)	토론
91(7/15 09:55)	29.0	50	1000	3	0	3
92	29.5	50	1000	0	0	0
93	30.0	49	999	0	0	0
94	30.0	49	999	0	0	0
95	30.5	48	998	12	12	4
96	30.5	48	998	3	0	3
97	30.5	48	998	3	6	0
98	30.5	49	998	0	0	6
99	30.0	49	998	0	0	0
100(7/15 18:55)	30.0	50	998	0	0	0
평균	30.05	49.00	998.60	2.10	1.80	1.60

(2) 시료(고령토벽돌)

표 2.2.28 시료(고령토벽돌) 측정치

측정 차수	온도 (°C)	습도 (%)	압력 (mbar)	측정치(Bq/m ³)		
				라돈	라돈(Fast)	토론
91(7/15 09:55)	29.0	60	999	12	18	3
92	29.5	60	999	2	11	1
93	29.5	59	999	9	6	4
94	30.0	59	998	3	0	3
95	30.0	59	998	0	0	6
96	30.5	59	998	3	0	3
97	30.5	59	998	2	14	12
98	30.5	59	998	0	0	0
99	30.0	59	998	2	11	1
100(7/15 18:55)	30.0	59	998	3	6	0
평균	29.95	59.20	998.30	3.60	6.60	3.30

차. 석고보드

본 실험에 사용된 석고보드는 이수석고를 소성하여 결정수의 일부를 탈수시킨 소석고를 주원료로 하여 표면을 원지로 피폭 성형한 판재로 건축물의 불연내장재로 사용되고 있다. 1개의 판은 180 X 90 X 0.9cm의 크기를 가지고 있으며 9450g의 질량이며 1m² 시공시 약 0.6장이 소요된다.(3.3m³시 2장) 실험용기의 최대 공간이 60cm의로 공간의 제약으로 각각의 크기를 30cm로 절단하여 이번 실험을 실시하였다.

2011.08.22 18:05분부터 측정을 시작하여 2011.08.26 12:05 ~ 22:05 시간의 측정 데이터를 사용 하였다

표 2.2.29 시료(석고보드) 질량

번호	질량(g)	번호	질량(g)
1	515.4	6	526.2
2	516.3	7	538.4
3	513.9	8	534.0
4	522.9	9	537.0
5	523.3	10	524.5
합계	5,251.9		



그림 2.2.29 시료(석고보드) 사진

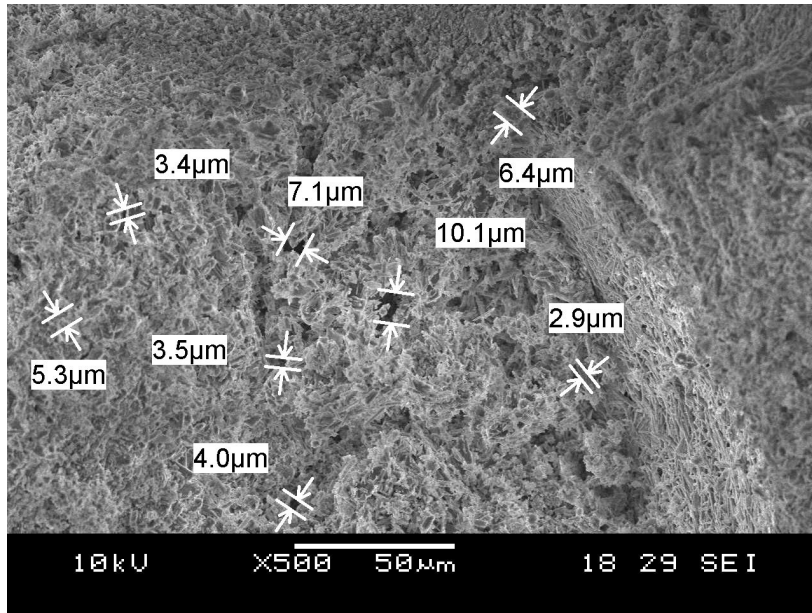


그림 2.2.30 시료(석고보드) 전자주사현미경 500배율 사진

측정결과

(1) BKG

표 2.2.30 시료(석고보드) 시험시 공시료 측정치

측정차수	온도 (°C)	습도 (%)	압력 (mbar)	측정치(Bq/m ³)		
				라돈	라돈(Fast)	토론
91(08/26 13:05)	29.5	51	1004	0	0	0
92	30.0	51	1003	3	11	1
93	30.0	52	1003	6	8	11
94	29.5	52	1003	10	11	4
95	29.5	53	1003	4	19	2
96	29.0	53	1003	0	0	0
97	28.5	53	1003	4	18	11
98	28.5	54	1004	6	6	3
99	28.0	55	1004	3	11	1
100(08/26 22:05)	28.0	55	1004	3	11	1
평균	29.05	52.90	1,003.40	3.90	9.50	3.40

(2) 시료(석고보드)

표 2.2.31 시료(석고보드) 측정치

측정차수	온도 (℃)	습도 (%)	압력 (mbar)	측정치(Bq/m ³)		
				라돈	라돈(Fast)	토론
91(08/26 13:05)	29.5	89	1003	8	15	5
92	30.0	89	1003	47	59	8
93	30.0	88	1002	30	37	14
94	29.5	87	1002	42	44	8
95	29.5	86	1003	41	47	8
96	29.0	85	1003	30	21	8
97	29.0	85	1003	11	15	6
98	28.5	84	1003	29	42	9
99	28.0	84	1003	17	15	8
100(08/26 22:05)	28.0	84	1004	35	42	7
평균	29.10	86.10	1,002.90	29.00	33.70	8.10

3. HPGe 분석결과

공기 중 라돈과 토론농도의 특이점이 보인 시료인 텍스(시멘트계), 에코카라트, 시멘트벽돌, 황토타일, 시멘트블럭, 석고보드를 분말상태로 만들어 450ml 용량의 폴리에틸렌용기에 가득 채웠다. 폴리에틸렌용기는 공기가 통하지 않도록 밀봉하여 일정시간 경과 후 건축자재 중에 존재하는 Ra^{226} , Th^{232} , U^{238} 및 K^{40} 의 방사능 준위를 측정파악하기 위하여 감마스펙트로메타(고순도 게르마늄 반도체(HPGe) 검출기, CANBERRA사)를 이용하여 80000만초 동안 계측 분석하여 농도준위를 조사 하였다.

Ra^{226} 의 방사능 농도 정량에서는 Ra^{226} 의 딸 핵종중의 하나인 Bi^{214} (609.3KeV)피크를 이용하였다. 그리고 Th^{232} 정량은 그의 딸핵종인 Tl^{208} (583 keV) 피크를 이용하였으며, K^{40} 정량은 1460.8 keV의 피크를 이용하였다.¹⁾



그림 2.2.31 HPGe 분석용 시료

가. 텍스(시멘트계)

질량 : 233.1g

샘플봉입일자: 2011.07.29 17:00

분석일자 : 2011.08.04 15:23

Live Time : 80000.0 seconds

Real Time : 80102.4 seconds

Dead Time : 0.13 %

Interference Corrected Report

표 2.2.32 텍스(시멘트계) HPGe시료 분석치

Nuclide Name	Nuclide Id Confidence	Wt mean Activity (Bq /KG)	Wt mean Activity Uncertainty
K-40	0.977	1.134441E+002	7.236599E+000
TL-208	0.680	3.109340E+000	1.701064E-001
BI-212	0.689	1.537385E+001	1.377895E+000
PB-212	0.997	1.335408E+001	5.705930E-001
BI-214	0.987	1.361114E+002	1.946521E+000
PB-214	0.997	1.376517E+002	2.759442E+000
RA-226	0.941	1.341324E+002	1.508864E+001
AC-228	0.486	1.286592E+001	3.885027E-001
TH-234	0.479	6.803843E+001	5.727136E+000
U-235	0.728	6.922809E+000	5.644279E-001

Errors quoted at 1.000 sigma

나. 에코카라트

질량 : 506.4g

샘플봉입일자: 2011.07.28 17:00

분석일자 : 2011.08.07 11:10

Live Time : 80000.0 seconds

Real Time : 80109.7 seconds

Dead Time : 0.14 %

Interference Corrected Report

표 2.2.33 에코카라트 HPGе시료 분석치

Nuclide Name	Nuclide Id Confidence	Wt mean Activity (Bq /KG)	Wt mean Activity Uncertainty
K-40	0.986	3.022831E+002	1.101598E+001
TL-208	0.969	1.550121E+001	3.684194E-001
BI-212	0.868	6.213506E+001	3.146506E+000
PB-212	0.999	4.663567E+001	1.142894E+000
BI-214	0.952	3.972268E+001	6.348886E-001
PB-214	0.997	4.279663E+001	9.688707E-001
RA-226	0.938	4.113714E+001	5.904019E+000
AC-228	0.971	4.637067E+001	6.115364E-001
TH-234	0.484	5.325989E+001	5.034600E+000
U-235	0.771	2.370444E+000	3.050913E-001

Errors quoted at 1.000 sigma

다. 시멘트벽돌

질량 : 621.7g

샘플봉입일자: 2011.07.28 17:00

분석일자 : 2011.08.05 16:17

Live Time : 80000.0 seconds

Real Time : 80113.5 seconds

Dead Time : 0.14 %

Interference Corrected Report

표 2.2.34 시멘트블럭 HPGe시료 분석치

Nuclide Name	Nuclide Id Confidence	Wt mean Activity (Bq /KG)	Wt mean Activity Uncertainty
K-40	0.994	6.843487E+002	2.292480E+001
TL-208	0.969	1.169976E+001	3.276955E-001
BI-212	0.868	4.348951E+001	1.587931E+000
PB-212	0.998	3.765943E+001	9.061270E-001
BI-214	0.945	2.959386E+001	4.839662E-001
PB-214	0.997	3.172410E+001	6.977654E-001
RA-226	0.939	6.766207E+001	3.873571E+000
AC-228	0.959	4.036190E+001	5.066733E-001
TH-234	0.485	3.353703E+001	2.462930E+000

Errors quoted at 1.000 sigma

라. 황토타일

질량 : 612.9g

샘플봉입일자: 2011.07.28 17:00

분석일자 : 2011.08.09 14:47

Live Time : 80000.0 seconds

Real Time : 80106.3 seconds

Dead Time : 0.13 %

Interference Corrected Report

표 2.2.35 황토타일 HPGe시료 분석치

Nuclide Name	Nuclide Id Confidence	Wt mean Activity (Bq /KG)	Wt mean Activity Uncertainty
K-40	0.995	4.017216E+002	1.398885E+001
TL-208	0.970	1.133283E+001	2.910492E-001
BI-212	0.866	4.021076E+001	1.600910E+000
PB-212	0.998	3.259275E+001	7.984796E-001
BI-214	0.940	2.261532E+001	4.042707E-001
PB-214	0.997	2.465093E+001	5.637979E-001
RA-226	0.938	4.797846E+001	3.524219E+000
AC-228	0.973	3.354321E+001	4.416822E-001
TH-234	0.485	3.243732E+001	3.272678E+000

Errors quoted at 1.000 sigma

바. 시멘트블럭

질량 : 660.3g

샘플봉입일자: 2011.07.28 17:00

분석일자 : 2011.08.08 11:44

Live Time : 80000.0 seconds

Real Time : 80112.8 seconds

Dead Time : 0.14 %

Interference Corrected Report

표 2.2.36 시멘트블럭 HPGe시료 분석치

Nuclide Name	Nuclide Id Confidence	Wt mean Activity (Bq /KG)	Wt mean Activity Uncertainty
K-40	0.995	6.851049E+002	2.315686E+001
TL-208	0.971	1.215747E+001	3.759363E-001
BI-212	0.867	4.849156E+001	2.405477E+000
PB-212	0.998	3.609699E+001	9.143944E-001
BI-214	0.950	2.863818E+001	4.991799E-001
PB-214	0.998	3.046331E+001	7.317679E-001
RA-226	0.940	4.072566E+001	5.982115E+000
AC-228	0.987	3.677436E+001	4.356425E-001
TH-234	0.483	4.379334E+001	4.632619E+000
U-235	0.763	1.844908E+000	2.592399E-001

Errors quoted at 1.000 sigma

마. 석고보드

질량 : 320.9g

샘플봉입일자: 2011.08.22 15:00

분석일자 : 2011.11.19 11:44

Live Time : 80000.0 seconds

Real Time : 80097.0 seconds

Dead Time : 0.12 %

Interference Corrected Report

표 2.2.37 석고보드 HPGe시료 분석치

Nuclide Name	Nuclide Id Confidence	Wt mean Activity (Bq /KG)	Wt mean Activity Uncertainty
K-40	0.973	8.043885E+001	4.443479E+000
TL-208	0.834	1.150401E+000	6.919941E-002
PB-212	0.999	3.335852E+000	3.284386E-001
BI-214	0.585	1.144302E+001	3.604390E-001
PB-214	0.999	1.112512E+001	3.737695E-001
AC-228	0.502	4.256014E+000	3.679174E-001
U-235	0.730	1.280053E+000	1.279554E-001

Errors quoted at 1.000 sigma

제 3 절 결 과

본 실험을 통하여 건축자재에서 방출되는 라돈농도를 통하여 위해 정도를 평가해 보려고 하였다. 표40과 같이 시료의 단일 질량당(Kg) 방출된 라돈의 농도는 텍스(시멘트계)가 121.7 Bq/m³ 로 가장 높게 나왔으며, 시멘트블럭 28.07 Bq/m³ , 시멘트벽돌 23.71 Bq/m³ 순서였다.

표 3.1.1 시료별 라돈/토론 방사량

시료명	질량(g)	10Kg 환산 인자	라돈(Bq/m ³)				토론(Bq/m ³)			
			BKG	시료	10Kg 환산	방사량 (Bq/m ³ Kg)	BKG	시료	10Kg 환산	방사량 (Bq/m ³ Kg)
텍스 (시멘트계)	10266	0.974	8.3	624.8	608.61	121.7	4.5	38	37.02	7.4
적벽돌	9631	1.038	4.6	5.3	5.50	1.1	2.0	4.4	4.57	0.9
에코카라트	9578	1.044	2.5	58.5	61.08	12.22	5.6	48.2	50.32	10.0
시멘트벽돌	11006.6	0.909	3.7	130.5	118.57	23.71	3.1	18.1	16.44	3.2
타일 (점토+석회석)	19962.8	0.501	3.6	6.4	3.21	0.64	1.1	3.5	1.75	0.35
황토타일 (황토+숯)	9832.2	1.017	2.1	33.2	33.77	6.75	2.4	33.9	34.48	6.8
타일(석고)	9979.9	1.002	1.8	4.1	4.11	0.82	3.1	6.3	4.31	0.86
시멘트블럭	10457	0.956	1.9	146.8	140.38	28.07	1.7	16.4	15.68	3.1
고령토벽돌	10277.5	0.973	2.1	3.6	3.50	0.7	1.6	3.3	3.21	0.64
석고보드	5251.9	1.904	3.9	29.0	55.22	11.04	3.4	8.1	15.42	3.08

하지만 실제 시공을 위한 단위 면적당(3.3m²) 시공 소요 자재를 기준으로 라돈방출 농도를 유추해본 결과 시멘트벽돌과 블럭이 10875.0 Bq/m³, 13065.2 Bq/m³로 높게 발생됨을 알 수가 있었으며 텍스(시멘트계)가 2811.6 Bq/m³ 로 순서가 바뀐 것을 알 수 있었다(표3.3.1).

표 3.3.2 시료별 라돈/토론의 3.3m² 시공시 농도

시료명	시료 수	3.3 m ² 시공 소요	라 돈(Bq/m ³)			토 론(Bq/m ³)		
			시료 측정치	예측치	3.3m ² 시공	시료 측정치	예측치	3.3m ² 시공
텍스(시멘트계)	8	18	624.8	1249.6	2811.6	38	76	171.0
적벽돌	6	250	5.3	10.6	441.7	4.4	8.8	366.7
에코카라트	11	36	58.5	117	382.9	48.2	96.4	315.5
시멘트벽돌	6	250	130.5	261	10875.0	18.1	36.2	1508.3
타일(점토+석회석)	7	21	6.4	12.8	38.4	3.5	7	21.0
황토타일(황토+숯)	12	40	33.2	66.4	221.3	33.9	67.8	226.0
타일(석고)	11	33	4.1	8.2	24.6	6.3	12.6	37.8
시멘트블럭	1	44.5	146.8	293.6	13065.2	16.4	32.8	1459.6
고령토벽돌	8	250	3.6	7.2	225.0	3.3	6.6	206.3
석고보드	10	36	29.0	58	208.8	8.1	16.2	58.3

표 3.3.3 각시료별 HPGe 분석치

시료명	텍스 (시멘트계) (Bq /KG)	에코카라트 (Bq /KG)	시멘트벽돌 (Bq /KG)	황토타일 (황토+숯) (Bq /KG)	시멘트블럭 (Bq /KG)	석고보드 (Bq /KG)
K-40	113.4	302.3	684.4	401.8	685.1	80.44
TL-208	3.1	15.5	11.7	11.3	12.2	1.15
BI-212	15.4	62.1	43.5	40.2	48.5	-
PB-212	13.4	46.7	37.7	32.6	36.1	3.34
BI-214	136.1	39.8	29.6	22.6	28.6	11.44
PB-214	137.7	42.8	31.8	24.7	30.5	11.12
RA-226	134.1	41.1	67.7	48.0	40.7	-
AC-228	12.9	46.4	40.4	33.5	36.8	4.26
TH-234	68.0	53.3	33.6	32.4	43.8	-
U-235	6.92	2.3	-	-	1.85	1.28

표 3.3.4 건축 재료에 대한 데시케이터 내의 포화 라돈농도(목재학회지, 일본)²⁰⁾

시료		비중	라돈 농도(Bq/m^3)	라돈 방사량(Bq/Kg)
석면 슬레이트 판		2.02	1,120~1,260	11.3~13.0
펄프 시멘트판		1.27	696~719	7.21~7.29
플라이애시판		1.26	579~668	5.87~6.92
석고보드		0.86	571~607	5.91~6.15
목편 시멘트판		1.18	328~356	3.40~3.61
규산칼슘 · 석면판		0.94	217~253	2.25~2.26
콘크리트 블록		-	130~135	1.03~1.16
라왕 합판		0.49	11.5~12.1	0.119~0.123
시멘트	알루미나 시멘트		228	2.38
	포틀랜드 시멘트		171~191	2.44~2.72
	고로 시멘트		184	2.62
	석면(아스베스트)		202	8.63
플라이애시			55.7	0.58
소다석회(소립상의 소다라임)			39.5	0.41
석고	무수석고		6~10	0.06~0.10
	천연석고		3	0.03
	인산석고		4700~7800	48~93

건축자재 중에 들어있는 Ra^{226} , Th^{232} , K^{40} 의 방사능 농도가 같다 하더라도 Ra^{226} , Th^{232} 의 딸핵종들과 K^{40} 이 방출하는 감마선에너지가 서로 다르기 때문에 피폭 선량 값은 서로 다르게 된다. 따라서 라듐등가농도라는 것은, Th^{232} 및 K^{40} 을 Ra^{226} 의 자손들로부터 방출되는 감마선량과 동일한 선량에 해당하는 방사능 농도로 환산하여 Ra^{226} 방사능 농도와 합한 값을 의미한다. 위험지수는 건축자재로부터 연간 유효선량을 1 mSv/hr로 가정할 때 평가지수를 의미한다.

표 3.3.5 IAEA 등에서 공산품 내의 방사능 양을 제한하기 위한 기준(안)⁴⁾

	IAEA The scope-defining levels		인증기준(안)	
	원안	단위환산값	Exemption level	Dose criterion for controls
			0.3 mSv 로 할 경우	1 mSv 로 할 경우
Ra-226	0.5 Bq/g	500 Bq/kg	120 Bq/kg	300 Bq/kg
Th-232	0.5 Bq/g	500 Bq/kg	100 Bq/kg	200 Bq/kg
K-40	5 Bq/g	5000 Bq/kg	1400 Bq/kg	3000 Bq/kg

위험지수 산출방식은 국가별로 다르나 STUK 및 국내에서 쓰이는 다음과 같은 공식을 이용하여 산출하였다.¹⁾¹⁹⁾

$$\text{위험지수(H)} = \frac{C_{Ra}}{300} + \frac{C_{Th}}{200} + \frac{C_K}{3000} \leq 1$$

여기서 C_{Ra} , C_{Th} , C_K 는 각각 Ra^{226} , Th^{232} 및 K^{40} 의 방사능농도(Bq/kg)이며 국내(환경표지)에서는 벽 및 천장 마감재, 실내바닥장식재에 경우 위험지수(H)가 1을 넘지 않을 것을 권고하고 있으며¹⁾ 본 연구에서 분석 평가한 6개 시료에서는 위험지수는 0.27 ~ 0.51로서 1을 넘지 않고 있음을 알 수 있다(표3.3.5).

표 3.3.6 건축자재에 존재하는 라듐의 양과 라돈 위험지수

건축자재	Ra^{226} 방사능농도 (Bq/Kg)	Pb^{210} 방사능농도 (Bq/Kg)	K^{40} 방사능농도 (Bq/Kg)	위험지수 (Harzard Index)
텍스(시멘트계)	136.1	3.1	113.4	0.51
에코카라트	39.8	15.5	302.3	0.31
시멘트벽돌	29.6	11.7	684.4	0.39
황토타일(황토+숯)	22.6	11.3	401.8	0.27
시멘트블럭	28.6	12.2	685.1	0.39
석고보드	11.44	1.15	80.44	0.07

라돈방사량과 자재내 Ra^{226} 농도를 비교시 에코카라트의 농도는 시멘트벽돌이나 황토 타일에 비해서 높게 측정되나 방사량이 적은 측면이 특이점으로 나타났다.

표 3.3.7 다양한 건축재에 존재하는 라듐의 양의 예와 라돈 위험지수¹⁾

건축자재	Ra ²²⁶ 방사능농도 (Bq/Kg)	위험지수 (Harzard Index)
일반벽돌	30.0 ± 12	0.57
적벽돌	36.4 ± 8.3	0.61
타일	58.1 ± 17	0.68
석고보드	271 ± 60	0.91
콘크리트	26.4 ± 0.9	0.48
시멘트	34.5 ± 1.7	0.29
목재	6.47 ± 1.8	0.06
화강석	53.1 ± 32	0.97
모래	28.9 ± 1.5	0.71
속빈벽돌	14.7 ± 1.0	0.41
황토흙	39.7 ± 2.1	0.83
황토흙 벽돌	33.3 ± 1.1	0.74

기존 연구자료를 통해 비교해 보았을 경우 높게 나온 텍스에 쓰이는 석고의 재질이 기존의 인산석고가 방사능 측면에서 많은 문제점이 제기됨에 따라 인광석의 주요 수입처를 모로코나 토고등에서 중국등 소량의 라듐이 함유된 산지 수입을 늘려 인산석고 사용 시의 라돈농도보다 상당량 줄어있음을 알 수 있고 시멘트 블록 및 벽돌은 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다.

제 3 장 결론 및 향후과제

본 연구는 건축자재에서 방출되는 라돈의 양에 대한 연구로 실내외 건축자재 10종을 선정하여 일정조건 하에서 라돈 방출율과 위험지수를 평가해 보았다.

라돈 방출량을 비교할 경우 실제 건축 시공 시 석고사용 제품보다 표면처리를 하지 않는 시멘트블럭 및 벽돌 시공에 기인한 라돈 피폭을 주의해야 함을 알 수 있다. 시료별 외부피폭선량정도평가를 위한 위험준위 측면에서는 권고치 이내로 평가되었으며, 앞으로의 추가적인 연구 및 실험을 통해 본 연구에서 텍스(시멘트계)와 시멘트벽돌, 블럭에 관심을 가져야 함을 알 수 있었다. 특히 텍스(시멘트계)의 원재료인 인산석고는 인산 생산시 부산물로 나오며 인산석고의 소비처가 시멘트계열제품 생산 및 석고계열제품생산에 사용됨에 그에 대한 영향을 생각해 보아야 할 것이다.

또한 라돈방출률과 시료 내 핵종량을 비교시 에코카라트에 특이성과 토양성분이 주를 이루는 황토타일과 적벽돌 고령토벽돌에 따른 라돈 방출량의 차이는 대하여 연구할 필요성이 있으며 자재의 두께, 표면처리, 다공성 및 밀도에 밀접한관계가 있는 것으로 보인다. 또한 본 실험에서 고 라돈 방출로 지목된 건축자재(시멘트계 텍스, 시멘트 벽돌, 블럭)에 대한 핵종 분석 및 기본재료인 석고(인산, 배면탈황)와 시멘트(단미, 혼합, 특수등)의 종류별 라돈 농도 분석과 핵종분석을 통하여 과다 방출되는 건축자재의 사용을 줄이는 방안 및 실내 사용을 자재할 수 있는 방안을 찾아야 할 필요성이 있으며 이에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다. 이러한 연구를 통하여 라돈의 영향을 파악하고 개인피폭선량을 저감할 수 있는 방법을 제시 하고자 하였으며 보다 낮은 라돈 방출을 보이는 건축자재의 사용을 국가가 적극적으로 홍보하고 관리해야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 방사선 안전규제기술 개발(KINS/GR-300 노병환 2005)
- [2] ICRP-65(Protection Against Radon-222 at Home and at Work 1993.9)
- [3] Technical Basis for a Candidate Building Materials Radium Standard
(EPA 600-R-96-022)
- [4] 실내 라돈 저감 가이드라인(환경부 2010.1)
- [5] <http://www.doopedia.co.kr> 두산백과사전
- [6] 건축자재에 의한 실내 라돈 농도 평가에 관한 연구(장미 서울대학교대학원 2003)
- [7] SOURCES, EFFECTS AND RISKS OF IONIZING RADIATION(UNSCEAR 1988)
- [8] 라돈 방사능과 생활 환경(주승환, 제일목 계축문화사 1995)
- [9] Injury Prevention and Control Reports.(the Centers for Disease Control and
Prevention' s National Center1999-2001)
- [10] Assessment of Risk From Radon in Homes(EPA 402-R-03-003)
- [11] A Citizen's Guide To Radon(EPA 402-K-09-001)
- [12] Radon Reduction Techniques for Detached House(EPA-625-5-87-019)
- [13] <http://kostat.go.kr> 통계청
- [14] RTM1688-2 user manual
- [15] 전주시 아파트 라돈농도의 측정 및 분석(한일수 전북대학교 대학원 2006)
- [16] 실내 라돈 측정에 있어서 실내공간의 체적과 측정되는 라돈농도의
상관관계 연구(강성아 전북대학교 대학원 2007)
- [17] 라돈 및 라돈 딸핵종의 시·공간적 모니터링과 상관성 분석(정재형
서울산업대학교 대학원 2008)
- [18] 실내공기중 라돈측정지침(환경부예규 2000.5.22 제202호)
- [19] The Radioactivity of Building Materials and Ash(STUK 12.2 2003)
- [20] 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)
- [21] ICRP-103(The 2007 Recommendations of the International Commission
on Radiological Protection 2007.3)
- [22] WHO HANDBOOK ON INDOOR RADON(WHO 2009)
- [23] Consumer 's Guide To Radon Reduction(EPA 402-K-10-005)
- [24] Building Radon Out(EPA 402-K-01-002)

부 록

ICRP 보고서에 따르면 피폭감축을 위한 조치가 거의 확실하게 필요한 준위로 라돈-222로부터 유효선량 연간 10mSv를 설정하였으며 이에 해당하는 방사능 농도의 상한 값은 작업방에서 1500Bq/m³로 가정에서는 600Bq/m³로 되어 있다.²⁾²¹⁾ 또한 국내 권고 기준치인 148Bq/m³의 라돈농도를 상회 하는 실내에서는 라돈농도의 저감을 위한 대책을 강구하여야 한다. 그 대책으로는 다음과 같이 요약할 수 있다.

라돈저감대책²⁾⁴⁾²²⁾²³⁾²⁴⁾

1. 주거공간의 환기

냉난방공기조화시스템을 통한 강제환기나 창문을 통한 환기를 이용하여 실내외 공기 교환을 할 수 있으나 냉난방의 에너지 손실을 초래한다. 따라서, 주요 라돈 발생원이 건축자재일 경우 애초에 라돈의 발생원이 되는 건축자재의 사용을 피하는 것이 에너지 효율측면에서 낫다.

2. 보강재를 이용한 틈새차단

마루틈 이나 이음새 밀봉을 통한 건축자재 틈새를 통한 라돈가스 유입 차단시키거나 폴리에틸렌시트를 통하여 슬래브안이나 층계 조립 시 형성된 틈으로부터의 토양 가스 출입을 감소시킬 수 있다.

3. 토양라돈 배출장치 도입

건축물 기초 토대 층에 약 10cm 두께로 깨끗한 자갈과 다공성관을 설치하여 건축물 내로 토양내 라돈의 유입을 차단시키고 선프와 팬을 이용 배기관을 통하여 대기내로 생성된 라돈을 배출 시킨다.

4. 외부공기 유입장치 도입

외부공기유입장치를 통하여 실내공기의 압력을 건물하부보다 인위적으로 높여 압력 차로 인한 라돈가스의 유입을 차단

5. 공기청정

라돈은 불활성기체라서 대부분이 비부착 라돈이지만 라돈의 자핵종은 전기적활성도를 띠기 때문에 공기청정을 통하여 제거가 가능하다. 하지만 공기를 청정함으로써 라돈을 제어할 때 주의점은 대부분의 공기청정기는 부유분진과 이에 부착된 라돈의 자핵종만을 제거함으로써 공기중의 비부착된 라돈이 존재하며 이러한 비부착 라돈은 체내로 유입 시 걸러지지 않고 폐 깊숙이 침투할 수 있기 때문에 인체에 더욱 위험할 수 있다.

라돈을 저감할 수 있는 더욱 자세한 내용은 환경부에서 2010년에 발간한 “실내 라돈 저감 가이드라인”을 통하여 확인할 수 있다.

감사의 글

기대와 설렘을 가지고 대학원 생활을 시작한 게 어제 같은데 어느덧 남들보다 1년을 더 보낸 긴 여정의 대학원생활의 결실인 논문을 바라보고 있으니 기쁨과 아쉬움 그리고 그 동안 저에게 도움을 주신 많은 분들이 생각납니다.

대학원 생활동안 보잘 것 없는 실력을 가지고 있는 저에게 일을 맡겨주시고 논문 테마부터 이 논문이 완성되기 까지 관심을 가져주시고 질타와 격려를 아끼지 않으신 정운관 지도교수님께 진심으로 감사드리며, 논문을 심사해주신 이경진 교수님, 김진원 교수님께도 감사 인사드립니다. 그리고 늘 따뜻한 관심으로 지켜봐주시며 부족한 저에게 학업에 대한 조언뿐만 아니라 인생에 대한 조언을 해주신 김송평 교수님, 나만균 교수님, 송종순 교수님께도 감사의 마음을 드립니다.

논문을 준비하는 저에게 많은 도움을 주신 동경래 교수님과 성호진 선생님 그리고 실험실에서 동고동락을 하며 도움과 격려를 해준 한이, 현석이, 도준이, 정하와 기은이 그리고 나와 같이 대학원 학업을 같이하며 나에게 많은 도움을 준 동기들인 정현이형, 강일이, 상헌이, 성한 그리고 후배인 동수, 민수, 영규, 민영, 사용, 재환, 심원, 주현 그리고 대학원 진학에 용기를 준 유선이형, 정민이형, 현영이형, 인호영, 동혁이형에게 깊은 감사를 드립니다. 그리고 이외에도 미처 언급하지 못한 여러 선후배들과 고마우신 분들께도 감사드립니다.

일 년 동안 방사선응용진흥센터에서 조교로 일하면서 많은 실수도 하였지만 저에게 따뜻한 보살핌과 많은 지도와 도움을 주신 정철기 실장님과 김대석 과장님 이현 선생님께도 감사하다는 말을 전해드리고 싶습니다.

또한 학교생활에 많은 도움과 즐거움을 준 기현, 병진이도 고맙고, 내 베스트 프렌드인 민영이, 주환이, 희성이 모두 고맙고 늘 반갑고 가깝게 지내도록 하자.

마지막으로 못한 형에게 힘이 되어주고 조언을 아끼지 않는 내 동생 승진이와 창진이 그리고 항상 저에게 응원해주시고 지켜주시며 힘이 되어주시는 아버지와 어머니께 고마움과 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다.

이제 막 저는 석사학위를 받았지만 아직 앞길은 멀고 험난할 것으로 생각합니다. 하지만 이제까지 저에게 도움을 주시고 이끌어 주신 분들을 믿으며 앞으로도 잘 해나갈 수 있을 것이라고 믿습니다. 이제, 오늘을 발판으로 한 걸음 더 나아가기 위해 언제나 최선을 다하는 내일이 되도록 열심히 노력 할 것을 약속드립니다.

저를 아껴주신 모든 분들에게 감사드립니다.

2011년 12월 어느 늦은 밤
주 용 진 올림.