

<원저>

대학의 실내 라돈가스 농도의 변화 평가

- Assessment of Indoor Radon Gas Concentration Change of College -

1)신구대학교 방사선과·2)송호대학교 방사선과

박훈희¹⁾·정의환¹⁾·김학재¹⁾·이주영²⁾·유광열¹⁾

— 국문초록 —

본 연구는 실내 라돈 가스의 농도를 낮추기 위한 방법을 찾기 위해 건물의 준공연도, 건물의 용적, 환기 세 가지 변수에 따른 실내 라돈 농도를 비교, 측정하여 그 영향을 알아보고자 한다. 측정은 1973년에 건축이 되었고, 2011년에 증축이 된 건물의 6층을 대상으로 용적이 서로 다르고 준공연도가 1973년과 2011년인 6개의 강의실을 측정하였다. 준공연도에 따른 라돈농도를 비교하기 위해 4개의 강의실을 선정하였고, 용적에 따른 라돈농도를 비교하기 위해 준공연도가 같고 용적이 다른 강의실을 선정하였고, 환기에 따른 라돈농도를 비교하기 위해 6개의 강의실의 폐쇄와 환기를 시행하였다. 결과적으로 준공연도에 따른 라돈농도는 최근에 지어진 건물에서 라돈농도가 최대 4배 높게 나타났으며, 용적에 따른 라돈농도는 용적이 작을수록 높게 나타났다. 환기에 따른 라돈농도의 변화는 폐쇄 시보다 환기를 할 경우 약 80%의 감소율을 보였다. 특히, 준공연도가 최근이면서 용적이 작을수록 라돈 농도가 높게 검출되었고, 세 가지 변수 중 환기가 라돈농도 감소에 가장 큰 영향을 끼쳐 라돈에 의한 피폭감소 효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

중심 단어: 라돈, 건물의 준공연도, 실내용적, 환기

I. 서 론

오늘날 현대인들은 일과의 약 80%를 실내에서 생활하고 있다고 해도 과언이 아닐 정도로 밀폐된 공간에서 생활하고 있다. 사람이 70년을 산다고 가정하면 56년간을 어떤 형태로든 실내 공간에서 생활한다고 할 수 있다¹⁾.

실내에서 보내는 시간이 증가하면서 실내 환경에 대한 관심과 그 중요성이 증가하고 있다. 특히 실내오염물질 중 하나인 라돈(Radon : ^{222}Rn)은 자연계에 널리 존재하는 자연 방사능으로 건축자재 및 지하수 등에 함유되어 있으며²⁾ 건물 하부의 갈라진 틈, 벽돌과 벽돌 사이, 벽돌 내의 기공, 바닥과 벽의 이음매, 건물에 직접 노출된 토양, 우수 배관로, 접합이 느슨한 관 사이, 건축자재, 관의 갈라진 틈, 지하수

의 이용 등에서 실내로 유입이 된다³⁾.

라돈은 무향, 무색의 불활성기체이며 붕괴과정에서 방사선을 방출한다. 방사선이 인체에 조사되면 방사선 에너지가 조직에 흡수되어, 그 조직이 방사선에 대한 감수성과 방사선의 물질과 상호작용 때문에 조직에 장애를 유발한다⁴⁾. 호흡에 의해 라돈이 체내로 들어오면 방사성 붕괴가 일어나 알파선을 방출하는 딸핵종을 생성하고, 딸핵종이 호흡기관 표면에 침착되어 딸핵종으로부터 발생하는 알파선이 인체의 세포를 손상시켜 폐암의 발생 위험률을 높이는 것으로 보고되었다. 또한, 국제 방사선영향과학위원회(United Nation Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation : UNSCEAR) 보고서는 일반인이 자연환경에서 받는 연간 피폭선량이 2.4 mSv이며 이중 라돈과 그 딸핵종에 기인한 피

폭선량은 자연방사선의 50%에 해당하는 1.3 mSv 정도라고 보고되며, 라돈과 그 딸핵종에 의한 피폭선량 중 79%가 가옥 내에서의 흡입에 의해 비롯된다고 보고하고 있다⁵⁾.

하지만, 공공시설에 대해서는 권고기준만 있을 뿐 주택의 실내 라돈 방출량과 관련한 규제가 없는 등 관리가 미흡하다. 측정 결과에 대한 신뢰성 확보가 부족하며, 광범위한 지역에서 장기측정과 고위험 지역 및 건축물에 대한 관리체계가 필요하다⁶⁾.

또한 국내에 보고된 라돈 연구 결과 증축된 건물에 대한 실내 라돈 농도 관련 연구는 아직 학계에 보고되지 않았다.

대학교 강의실은 많은 사람이 좁은 공간에서 대부분의 시간을 보내는 공간으로 실내 라돈에 장시간 노출될 가능성이 높으므로 강의실 내 라돈 농도에 대한 지속적인 관심과 관리가 필요하다⁷⁾.

이에 따라 본 연구에서는 1973년에 건축되었으며, 2011년에 증축을 한 경기 성남시 일개 대학 강의실의 실내 라돈 농도를 측정하고, 강의실의 준공연도, 용적, 환기에 따른 실내 라돈 농도를 측정하고 그의 상관관계를 평가하였다.

II. 대상 및 방법

1. 대상 및 장비

실내 라돈 농도의 측정을 위해 반도체 이용 라돈 측정기 RAD7 (DURRIDGE, Boston, US)을 사용하였다(Fig. 1).

측정 건물은 1973년에 건축되었고, 2011년에 증축되었다. 동일한 지반을 두고 증축이 되었기 때문에 준공연도에 따른 라돈농도를 비교하기에 알맞고 총 7층의 도면도상 6층이 1973년에 건축된 강의실과 2011년에 증축된 강의실이 비슷한 크기를 가졌기 때문에 6층의 강의실을 대상으로 하였다.

1973년에 건축된 강의실 중 서로 다른 크기의 강의실(A,



Fig. 1 RAD7 radon measuring instrument was used for measurement of indoor radon concentrations.

Table 1 6 Classrooms size

Year of completion	Classroom	Volume (m ³)	Area (m ²)	Area per volume (m ⁻¹)
1973	A	56.25	92.50	1.64
	B	168.75	217.5	1.28
	C	201.87	251.5	1.24
2011	D	60.10	97.26	1.62
	E	225.00	275.0	1.22
	F	337.50	387.5	1.15

B, C)을 선정하고, 이와 가장 유사한 크기를 갖는 2011년에 준공된 강의실(D, E, F)을 선정하였다(Table 1), (Fig. 2).

2. 데이터 획득

라돈측정기는 각 강의실의 창문을 마주 본 상태에서 출입문 쪽에 위치시켜 그 측정값을 얻었다. 강의실별 측정은 1시간을 주기로 하여 총 48시간을 측정하였으며, 총 48시간 중 24시간은 창문과 출입문을 폐쇄한 상태에서 측정하고, 나머지 24시간은 창문을 개방한 상태에서 측정하였다.

창문은 강의실 D의 용적에 대한 창문 2개의 면적 비를 모은 강의실에 적용하여 개방하였다. 강의실 D의 용적은

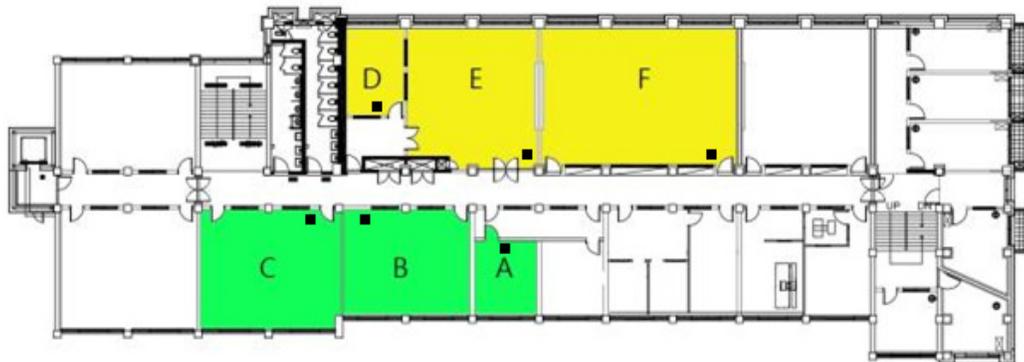


Fig. 2 A blueprint of 6th floor one university. Class A, B, C were constructed in 1973 and D, E, F were extended in 2011. Small black boxes are the radon measurement sites

60.10 m³ 이고, 창문 2개의 면적은 0.52 m²이다. 각 강의실의 창문개방은 [1] 식을 적용하여 용적에 대한 창문의 면적비를 동일하게 하였다(Table 2).

$$\frac{0.52 m^2}{60.10 m^3} \times \text{volume of the classroom} \quad [1]$$

Table 2 Opened window area according to the classroom volume

Classroom	Volume (m ³)	Opened window area (m ²)
A	56.25	0.48
B	168.75	1.45
C	201.87	1.73
D	60.10	0.52
E	225.00	1.93
F	337.50	2.90

라돈 측정기의 민감도는 기본적으로 설정된 Normal 모드에서 0.4 cpm/pCi/L, 펌프(pump) 속도는 1 L/min으로 하여 측정하였다. 강의실을 바꿔 측정할 때에는 측정값의 정확성을 위해 약 10~15분간 김철기 내부에 존재하는 잔여 공기를 배출(purge)하고 이전 강의실의 라돈을 환기한 후 측정하였다.

3. 데이터 분석

라돈 데이터 분석은 Capture version 5.5 (DURRIDGE, Boston, US) 프로그램을 이용하여 라돈 농도를 분석하였다 (Fig. 3).

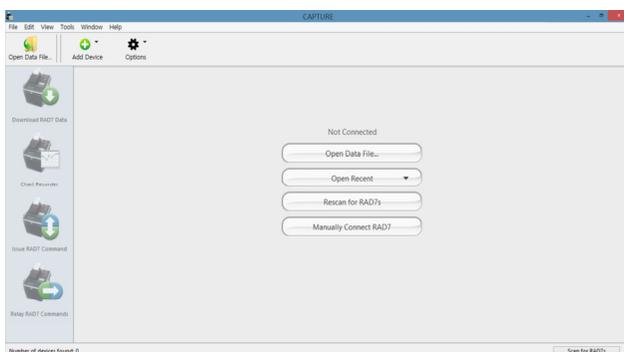


Fig. 3 Capture (version 5.5) is program for analysis of Radon data measured by the RAD7

각각의 데이터 비교 방법은 48시간 동안 얻은 측정값 중

0시부터 8시에 측정된 값의 평균값을 구하여 비교하였다 (Fig. 4)

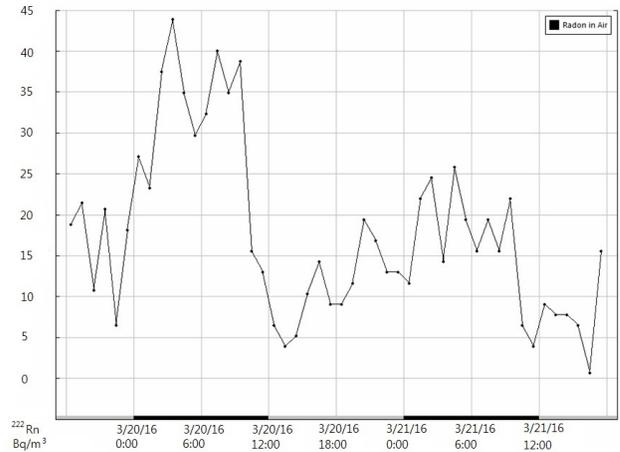


Fig. 4 This graph is a radon concentration according to time in 'A' classroom

실내 공간은 직육면체, 사다리꼴 등 여러 형태의 구조를 갖기 때문에 라돈농도를 비교하기 위하여 용적에 대한 면적비를 적용하였다⁸⁾.

측정 강의실은 실내 공간의 구조가 직육면체의 형태를 가지고 있다(Fig. 5). 높이가 일정할 경우 다음과 같이 용적에 대한 면적 비는 용적과 반비례 관계를 갖는 [2] 식이 성립한다.

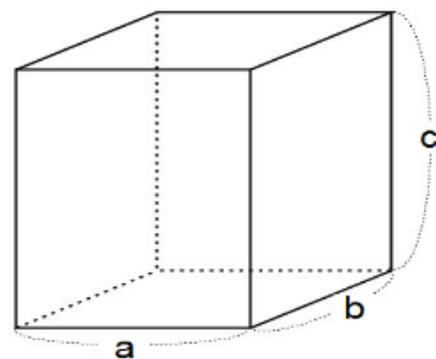


Fig. 5 The structure of measured classrooms is cuboid.

$$\begin{aligned} & \frac{2(ab+ac+bc)}{abc} \\ &= \frac{2(ab+a+b)}{ab} \quad [2] \\ &= 2\left(1 + \frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right) \end{aligned}$$

Table 3 Radon concentration according to the year of building completion

Year of completion	Classroom	Volume (m ³)	Bq/m ³
1973	A	56.25	33.5±4.7
	C	201.87	20.0±2.9
2011	D	60.10	96.5±8.0
	E	225.00	80.2±7.0

Table 4 Radon concentration according to volume

Year of completion	Classroom	Volume (m ³)	Bq/m ³
1973	A	56.25	33.5±4.7
	B	168.75	25.1±5.8
	C	201.87	20.0±2.9
2011	D	60.10	96.5±8.0
	E	225.00	80.2±7.0
	F	337.50	59.7±6.0

강의실의 준공연도에 따른 라돈 농도 변화 비교를 위해 준공연도가 다른 강의실 중 용적이 비슷한 강의실(A, C, D, E)을 선정하여 분석하였다. 강의실 A와 C는 준공연도가 1973년이고, 강의실 D와 E는 준공연도가 2011년이다. 서로 다른 준공연도에 따른 라돈 농도를 비교하기 위해 용적이 비슷한 강의실을 기준으로 하여 A와 D, C와 E를 각각 비교하였다.

또한, 강의실의 용적에 따른 라돈 농도 변화를 비교하기 위해 준공연도가 같고 강의실의 용적이 다른 6개의 강의실을 선정하여 분석하였다. 준공연도가 1973년인 강의실(A, B, C)을, 준공연도가 2011년인 강의실(D, E, F)을 각각 비교하였다.

또한, 환기에 따른 라돈 농도 변화 비교를 위해 6개의 강의실을 환기 전과 환기 후로 나누어 각각 비교하였다.

III. 결 과

1. 강의실의 준공연도에 따른 라돈 농도 변화 비교

준공연도가 서로 다르고 용적이 비슷한 A와 D의 측정값은 33.5±4.7 Bq/m³와 96.5±8.0 Bq/m³으로 준공연도가 2011년인 D의 라돈 농도가 높았다. 또, C와 E는 20.0±2.9 Bq/m³와 80.2±7.0 Bq/m³으로 준공연도가 2011년인 E의 라돈 농도가 높았다(Table 3). A보다 D의 라돈 농도가 2.9배 높았고, C보다 E의 라돈 농도가 4.0배 높았다.

2. 강의실의 용적에 따른 라돈 농도 변화 비교

준공연도가 1973년인 강의실(A, B, C)의 용적은 각각 56.25 m³, 168.75 m³, 201.87 m³로 라돈 농도를 비교했을 때 A, B, C는 각각 33.5±4.7 Bq/m³, 25.1±5.8 Bq/m³, 20.0±2.9 Bq/m³로 A가 1973년에 준공된 강의실 중 라돈 농도 수치가 가장 높았다(Table 4).

준공연도가 2011년인 강의실(D, E, F)의 용적은 각각 60.10 m³, 225.00 m³, 337.50 m³로, 라돈 농도를 비교했을 때 96.5±8.0 Bq/m³, 80.2±7.0 Bq/m³, 59.7±6.0 Bq/m³로 D가 2011년에 준공된 강의실 중 라돈 농도 수치가 가장 높았다.

3. 환기에 따른 라돈 농도 변화 비교

환기 전과 후를 비교했을 때 라돈 농도는 확연한 차이가 나타났기 때문에 환기는 라돈 농도의 감소에 큰 영향을 준다(Table 5), (Fig. 6). 특히 환기 후 라돈농도는 10 Bq/m³ 전후로 나타났으며, 준공연도가 2011년인 강의실의 경우 더 높은 감소율을 나타냈다.

IV. 고 찰

국제방사선 방호위원회(ICRP)에서는 실내라돈의 연간 선량 참조 준위의 상한값을 10 mSv로 권고하고 있다. 이에 따라 ICRP가 제시하고 있는 10 mSv를 초과하지 않게 실내 라

Table 5 Radon concentration according to before and after ventilation

(unit : Bq/m³)

Classroom	Before ventilation	After ventilation	Decrease rate
A	33.5±4.7	9.6±2.4	71.4%
B	25.1±5.8	10.6±2.6	57.8%
C	20.0±2.9	9.1±2.6	54.4%
D	96.5±8.0	10.0±2.6	89.7%
E	80.2±7.0	7.0±3.1	91.3%
F	59.7±6.0	5.3±1.9	91.1%

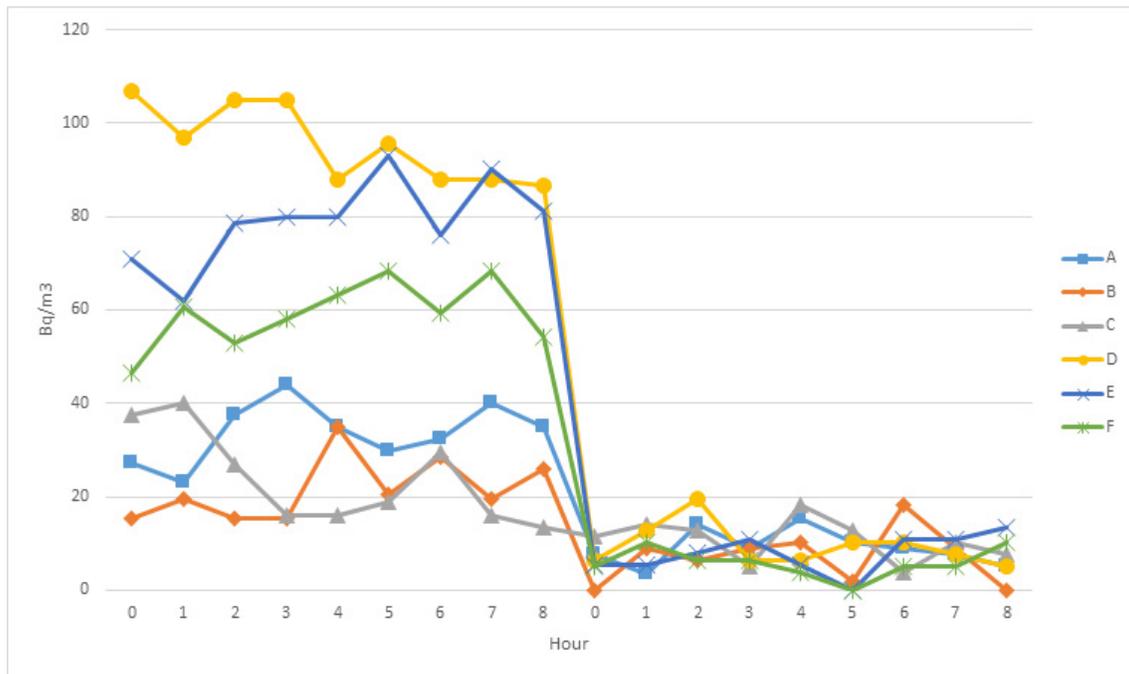


Fig. 6 This graph is the radon concentration according to time in 6 classroom. Before ventilation is First 0 to 8 hour and After ventilation is Second 0 to 8 hour

돈 농도를 관리할 필요가 있다⁹⁾.

공공기관에서는 라돈에 대한 관심이 높아지고 있는 추세이며 많은 다양한 선행연구가 진행되었다.

지상과 지하의 공기 중 라돈 가스 량을 비교했을 때 지하의 라돈 가스 량이 높게 나타난다고 보고되었다. 그 이유는 지하는 지상보다 환기가 잘 안되고 암반층과 가까워서 방출되는 라돈 가스의 유입이 쉽기 때문이다¹⁰⁾. 또 건물의 층별에 대한 라돈 농도 변화는 고층으로 올라갈수록 라돈 농도가 낮아진다. 그 이유는 라돈의 비중이 공기보다 9.73배 무거워 대기 중에서 수직 방향으로의 이동이 제한되기 때문이다¹¹⁾. 지질 특성에 대한 라돈 농도 변화는 화강암에 위치한 건물의 실내 라돈 농도가 다른 지질 특성에 비해 높게 나타난다고 보고되었다. 그 이유는 화강암은 우라늄 함량이 높아 우라늄의 딸핵종인 라돈 또한 많이 함유되어 있기 때문

이다¹²⁾. 건축자재별 실내 라돈 농도는 시멘트 벽돌이 가장 높고, 에코카라트, 석고보드 순으로 나타났다¹³⁾. 시간과 온도에 대한 라돈 농도의 변화는 새벽 4시부터 오전 7시까지 최댓값을 보이고, 오후 1시에서 4시 사이에 최솟값을 나타낸다고 보고되었다. 그 이유는 야간에는 지상 부근의 복사 냉각으로 역전층이 발생하여 대기가 안정화됨에 따라 라돈의 수직적 혼합을 감소시키고, 일출에 따른 온도상승이 역전층을 소멸시키게 되면 이러한 현상이 사라져 라돈 농도가 감소하기 때문이다⁸⁾. 습도에 따른 라돈 농도 변화는 고농도 지점에서는 양의 상관성을 가지지만, 저농도 지점에서는 라돈과 상관성이 뚜렷하지 않다¹⁴⁾. 계절에 따른 라돈 농도 변화는 여름에는 토양의 수분 함량이 낮아 라돈 가스 농도가 증가하고, 적설이나 지면동결 때문에 겨울에는 감소한다¹⁵⁾.

본 논문에서는 건물의 준공연도, 건물의 용적, 환기에 따

른 실내 라돈 농도의 변화를 평가하여 실내 라돈 농도의 저감 방안을 마련하고자 한다.

6개 강의실의 실내 라돈 농도를 분석한 결과, 건물의 준공연도에 따른 실내 라돈 농도의 변화는 새로 증축된 강의실이 바닥과 벽 등에 균일이 적어 밀폐도가 높아 라돈이 잘 빠져나갈 수 없는 환경이 되므로 상대적으로 라돈 농도가 높게 나타난다. 건물의 용적에 따른 실내 라돈 농도 변화는 용적이 클수록 라돈 농도가 낮게 나타났다.

본 연구에서 측정된 강의실은 높이가 같은 직육면체의 구조이므로 건물의 용적, 용적에 대한 면적 비와 실내 라돈 농도의 상관관계가 모두 성립하지만, 실내 구조가 사다리꼴, T자 구조 등 다른 구조를 갖는 실내 공간의 경우에는 용적과 라돈 농도의 반비례관계가 성립하지 않고 라돈 농도와 용적에 대한 면적 비는 비례관계를 갖는다⁸⁾.

환기에 의한 실내 라돈 농도 변화는 환기를 시행하였을 때 라돈 농도가 낮게 나타났다. 그 이유는 외부 공기의 유입으로 라돈 농도가 희석되어 감소하기 때문이다.

실내 라돈의 농도를 감소시키기 위해 건축 시에는 라돈을 배기할 수 있는 환기 시스템을 기초로 설치하여야 하고, 실생활에서 잦은 환기가 필요하다고 사료된다. 또한, 실내 라돈의 위험성에 대한 경각심을 인식할 필요가 있다고 여겨진다.

본 논문은 다음과 같은 제한점이 있었다. 첫째, 48시간을 측정했음에도 불구하고 총 16시간의 측정 데이터를 사용하였다. 학기 중 학생의 출입이 있었고, 측정기를 48시간 관리 할 수 없었기 때문에 사람의 출입이 없는 0시~8시의 데이터 값을 사용하여 많은 표본의 수를 사용하지 못했다. 둘째, 측정시간이 짧아 데이터의 신뢰성이 떨어진다. 라돈이 항상 일정하게 방출되지 않기 때문에 측정시간과 측정횟수를 늘려서 데이터의 오차를 줄여 신뢰성을 높일 필요가 있다. 셋째, 건물의 건축자재에 따른 라돈 농도 변화를 고려하지 못했다. 고층일수록 지반 특성보다 건축자재가 라돈 농도의 변화에 영향이 크기 때문에 건축자재를 고려할 필요가 있다.

V. 결 론

본 실험에서는 실내 라돈 가스 농도를 평가하기 위해 라돈 측정기를 이용하여 일개 대학의 강의실 6개를 측정하였다. 건물의 준공연도, 실내 공간의 용적과 환기 여부에 따른 라돈 농도 변화를 평가하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

건물의 준공연도에 따른 라돈 농도는 준공연도가 1973년인 강의실 A는 33.5 ± 4.7 Bq/m³, 2011년인 강의실 D는 96.5 ± 8.0 Bq/m³로 측정되었으며, 오래된 건물일수록 라돈 농도가 낮게 검출되었다.

건물의 용적에 따른 라돈 농도는 증축연도가 2011년인 강의실 중 용적이 가장 작은 D가 96.5 ± 8.0 Bq/m³로 가장 높게 측정되었고, 용적이 작을수록 높아지는 경향을 보였다.

환기 시 실내 라돈 농도는 환기 전보다 환기 후에 평균 76.0%가 감소하였고, 환기는 라돈 농도 감소에 직접 작용하였다.

그러므로 환기에 따른 라돈농도의 변화는 폐쇄 시보다 환기를 할 경우 약 80%의 감소율을 보였다. 특히, 준공연도가 최근이면서 용적이 작을수록 라돈농도가 높게 검출되었고, 세 가지 변수 중 환기가 라돈농도 감소에 가장 큰 영향을 끼쳐 라돈에 의한 피폭감소 효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

REFERENCES

1. Dae-Hwan Kim, Indoor Radon Emission and Reduction Measures by Ventilation, Graduate School Ulsan University, 1-49, 2014
2. Philip K. Hopke, Radon and It's Decay Products, ACS Symposium Series; American Chemical Society, 0331, 512-586, 1987
3. In Cheol Im, Radon concentration measurement at general house in Pusan area, The journal of Korean Society of Radiological Science Vol. 27, No. 2, 29-33, 2004
4. Seok won Cho, Hoon-Hee Park, Jung yul Kim et al, A study to Decrease Exposure Dose for the Radiotechnologist in PET/CT, The Korean Journal of Nuclear Medicine Technology, Vol. 14, No. 2, 159-165, 2010
5. United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation, Source Effects and Risks of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly with Annexes, 1988
6. Choi Im-Jo, Concentration Distribution and Characteristic of Radon for Public Facilities in Daegu Area, Graduate School of Gyeongbuk University, 1-53, 2008

7. Jee-woong Ryu, A study on the Measurement and Evaluation of IAQ in School Classroom, Graduate School of Chungju National University, 1-76, 2008
8. Sung-a Kang, A Study on the Correlation between the Volume of Indoor Space and the Measured Concentration of Indoor Radon, Graduate School Chonbuk National University, 1-78, 2007
9. ICRP, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP publication 103, United Kingdom
10. Jaeho Song, Gyehwan Jin, Evaluation of Indoor Radon Levels in a Hospital Underground Space and Internal Exposure, The journal of Korean Society of Radiology Vol. 5, No. 5, 231-235, 2011
11. Young-Sik Kim, The Study of Radon Concentration According to Building of Stars, The journal of Korean Society of Environmental Health Vol. 31, No. 1, 94-98, 2004
12. Su Jin Oh, A Study of Indoor Radon Concentration at Elementary Schools, House and Offices in Chungchungnamdo, Graduate School of Soonchunhyang University, 1-63, 2014
13. Hoon Chae Park, Hang Seok Choi, Seung Yeon Cho et al, Numerical Study on Indoor Dispersion of Radon Emitted from Building Materials, The journal of KSEE Vol. 36, No. 5, 325-332, 2014
14. Jae Hyung Jung, Time and spatial distribution characteristics between Radon-222 and its daughters Concentrations and Correlations Analysis, Graduate School of Energy and Environment, Seoul National University of Technology, 1-78, 2009
15. Dong-Myung Lee, Chang-Kyu Kim, Byung-Hwan Rho et al, Diurnal and Seasonal Variations of the Radon Progeny Concentrations in the open Atmosphere and the Influence of Meteorological Parameters, The journal of Korean Association Radiation Protection, Vol. 25, No. 4, 207-216, 2000

•Abstract

Assesment of Indoor Radon Gas Concentration Change of College

Hoon-Hee Park¹⁾·Euihwan Jeong¹⁾·Hak-Jae Kim¹⁾·Juyoung Lee²⁾·Kwang Yeul Lyu¹⁾

¹⁾*Department of Radiological Technology, Shingu College*

²⁾*Department of Radiological Technology, Songho College*

The purpose of this study was to assess the impact by comparing the concentration of indoor radon and look for ways to lower the concentration of indoor radon gas measurements of three variables, the year of completion, volume of the building and ventilation.

Measurement target is six classrooms on the sixth floor of building that was constructed in 1973 and was extended in 2011. Selected classroom's volume is different. Four classrooms were selected to compare the radon concentration in accordance with the year of completion, Classrooms that is same year of completion were selected to compare the radon concentration in accordance with the volume, six classroom was performed closure and ventilation to compare radon concentration according to ventilation.

Radon concentrations in accordance with the year of building completion showed a high concentration of radon in a building recently built. Also, Radon concentration in volume is high the smaller the volume. Radon concentration change according to ventilation showed a reduction of about 80% when the ventilation than during closing.

Especially, The radon concentrations were high detected while the recently year of building completion and the smaller volume. Ventilation of the three variables is considered that can be expected to exposure reduction effect by radon affecting the greatest radon concentration reduction.

Key Words : Radon, Building completion, Volume of the building, Ventilation