

## Elementary School in Gwangju Gwangsan Radon gas Density Measurement

Byungju Ahn, Jihoon Oh

Dept. of Radiology, Nambu University

## 광주광역시 광산구 소재 초등학교 라돈가스 농도 계측

안병주, 오지훈

남부대학교 방사선학과

## Abstract

Radium is rock or soil of crust or uranium of building materials after radioactivity collapse process are created colorless and odorless inert gas that accrue well in sealed space like basement. It inflow to lung circulate respiratory organ and caused lung cancer because of deposition of lung or bronchial tubes. In this study, the air in the elementary school classroom nongdoeul tonkatsu place of measured values were compared using the calculated annual internal radiation exposure . La tonkatsu exposure measured in primary school classroom at least five schools when you close the windows in the average floor 0.56mSv 2 floors ground floor windows when opened 0.384mSv 0.48mSv 3 floors , 2 floor levels of the same three layers 0.31mSv 0.296mSv the human exposure to radon and radiation on the first floor of 3 floors above ground in a lot of exposure was moderate. When you close the window from the first floor up 0.384mSv 0.56mSv 3 floors with a minimum annual radiation exposure due to natural radiation in the 16 to 23.3 percent minimum 2.4mSv accounted for . When I opened the window to the maximum annual radiation exposure 2.4mSv 0.296mSv 0.31mSv least a minimum of 12.3 to 12.91% accounted for Results suggest that more than five chodeunghakgyoeun La tonkatsu domestic radon measurements conducted below regulatory requirements and internal exposure has also fall within the normal range . People The less the radiation exposure to the human body because it reduces the impact in the classroom in elementary school vent windows often reduced to the maximum radon concentration in the air , if called tonkatsu be able to reduce radiation exposure for the immune system is weak and elementary will be helpful to experiment more in the future for the school authorities called tonkatsu investigation is done to him if the action to establish a more secure school building facilities is thought would be helpful .

Key Words : Radon gas Density measurement, Elementary Building, Radon dose

## 요약

자연방사선 물질인 라돈( $^{222}\text{Rn}$ )은 암석이나 토양 또는 건축자재 중에 들어있는 우라늄( $^{238}\text{U}$ )이 몇 단계의 방사성 붕괴 과정을 거친 후 생성되는 무색무취의 불활성기체로 지하 근무지나 밀폐된 공간과 같은 곳에서 잘 축적된다. 호흡기를 통하여 허파로 유입되고 라돈의 딸핵종이 허파나 기관지에 침적되어 폐암을 일으키는 원인이 된다. 본 연구에서는

Corresponding Author: Byeongju An  
Add. 506-706, NamBu Univ., Wolgye-dong, Gwangsan-gu, Gwangju, Korea  
Received : March, 26, 2014

E-mail: anju6010@nambu.ac.kr  
Revised : June 20, 2014

Tel: +82-010-6744-7575  
Accepted : June 25, 2014

초등학교 교실내의 공기 중 라돈가스농도를 비교하였으며 측정된 값을 이용하여 연간내부피폭량을 계산하였다. 초등학교 교실에서 측정된 라돈가스 피폭은 최소 5개교에서 층별 평균치가 창문을 닫을 때의 경우 1층 0.56mSv, 2층 0.48mSv, 3층 0.384mSv의 평균치가 나왔으며, 창문을 열었을 때의 경우 1층과 2층은 0.31mSv 수치로 같고 3층은 0.296mSv로 평균치가 나왔다. 라돈에 대한 인체 피폭은 1층에서 피폭이 많고 3층에서는 피폭이 적었다. 창문을 닫았을 때의 경우 최대 0.56mSv 최소 0.384mSv로 자연방사선에 의한 연간피폭량에 2.4mSv 16%에서 23.3%를 차지하고 있다. 창문을 열었을 때의 경우 최대 0.31mSv 최소 0.296mSv로 연간피폭량 2.4mSv의 12.3%에서 12.91%를 차지한다. 결과로 보아 라돈가스 측정을 실시한 5개 초등학교의 경우 국내의 라돈기준치 이하로 나왔으며 내부피폭 역시 정상범위 내에 속한다. 사람에게 있어서 방사선피폭이 적으면 적을수록 인체에 대한 영향이 줄어들기 때문에 초등학교 교실내에서 창문을 자주 환기한다면 즉, 공기 중 라돈농도를 최대한 줄인다면 라돈가스에 대한 피폭량을 줄일 수 있을 것이며 면역력이 약한 초등학생에게 도움이 될 것이다. 실험에 있어서 향후 더 많은 초등학교 기관에 대해 라돈가스 조사가 이루어지고 그에 따른 조치를 행한다면 보다 더 안전한 초등학교 건물시설 확립에 도움이 될 것이라 생각된다.

중심단어: 라돈가스농도측정, 초등학교건물, 라돈피폭선량

## I. INTRODUCTION

우라늄( $^{238}\text{U}$ )의 붕괴과정에서 생성되는 방사성기체인 라돈( $^{222}\text{Rn}$ )은 발생원 중 토양에서 85%이상으로 토양의 공극물이 클수록 토양 밖으로 방출할 수 있는 가능성이 많은 동위원소이다<sup>[1]</sup>. 라돈( $^{222}\text{Rn}$ )은 암석이나 토양 같은 지각물질에서 발생하는 3.82일의 반감기를 가진 자연 방사선물질<sup>[2]</sup>로 우라늄의 6번째 붕괴 생성물이다<sup>[3]</sup>. 방사성 붕괴 계열에서 생성되는 무색, 무취, 무미의 불활성 기체로 흡연 다음으로 폐암을 유발하는 원인물질로 잘 알려져 있다<sup>[4]</sup>.

붕괴 시 생성되는 라돈의 딸핵종들도 알파선, 베타선 또는 감마선을 방출한다. 라돈 딸핵종(radon daughters and progeny)은 공기 중에서 어떤 물체의 표면에 흡착된 형태로 체내로 흡입되고 폐에 흡착되며 이때 방출되는 알파 방사선의 영향으로 인하여 장기적으로 폐암이 유발 될 수 있다<sup>[5]</sup>. 특히 지하 근무지나 밀폐된 공간에서는 환기율이 낮아 라돈에 의한 방사선 피폭의 가능성이 높다<sup>[6]</sup>.

우리나라의 공기 중 라돈가스 권고기준치는 148 Bq/m<sup>3</sup> 이하로 정하고 있으며 UN과학위원회(UNSCEAR)의 조사결과에서는 인간이 자연방사선으로부터 받는 연간피폭선량(2.4mSv/y) 중 약 50%에 해당하는 1.2mSv/y가 라돈에 의한 것이라는 것이 보고되었고<sup>[7]</sup> 우리나라의 전국 연평균 유효선량은 1.62mSv/y로 국제방사선보호위원회(ICRP)의 라돈 선량 권고기준인 10 mSv/y<sup>[8]</sup>보다 낮은 준위이다. 이러한 라돈은 흡연 다음

으로 폐암의 2차 원인물질로 알려져 있는데 이는 일산화탄소의 독성보다 100배 이상의 치사율을 보여준다는 연구결과가 있으며<sup>[9]</sup> 라돈의 주요한 피폭경로는 호흡을 통해 라돈을 체내로 흡수할 경우 장기적으로 폐암이 유발될 수 있다<sup>[10]</sup>. 또한, 미국 환경청(Environmental Protection Agency)은 라돈이 담배 흡연에 이어서 두 번째 폐암 발생의 주요 원인이라고 보고하였다<sup>[11]</sup>. 또한 어린이 및 청소년의 경우 실내에서 생활하는 시간이 길고 성인에 비해 호흡량이 많으며 오염물질에 대한 면역력이 약하기 때문에 오염물질에 노출될 가능성이 많으므로 적절한 조치가 필요하지만 현실은 부족한 실정이다<sup>[12]</sup>.

본 연구는 한 광역시의 구를 선택하여 그 중 42개 초등학교 중 산업단지가 밀집되어 있는 5개 학교에서 표본 추출하여 초등학교 건물 각 층(1층, 2층, 3층)에 대한 교실내의 라돈가스 농도를 창문을 열었을 때와 창문을 닫았을 때를 측정하고자 하며 환기상태에 따라 라돈가스농도의 변화를 알아보하고자 한다.

## II. Study plan and Method

### 1. 연구계획

초등학교 측정 후 선정된 초등학교 건물의 라돈가스를 7월부터 12월까지 5개월간 측정한다. 측정된 라돈가스( $^{222}\text{Rn}$  gas)의 농도분석 및 통계치를 산출한다. 초등학교 측정대상을 선정 후 7월부터 4개월간 초등학교 건물 라돈가스를 측정한다. 그 이후 Rn-222 가스 측

정농도 분석 및 통계를 낸다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 측정원리

측정은 연속모니터측정기 (continuous radon monitors) 로 측정하였으며 이는 다음과 같은 세 가지의 원리로 측정을 하는 방식을 가지고 있다.

#### 1) 섬광셀 방식 (scintillation cell)

필터를 거친 후, 자연확산 또는 동력펌프를 통해 셀 내로 유입된 라돈으로부터 셀 내부에 생성된 라돈자손에서 방출되는  $\alpha$  입자와 ZnS(Ag)가 반응하여 나온 빛을 광증배관으로 증폭하여 계수하는 것이다.

#### 2) 펄스이온화함 (pulsed ionization chambers)

전위계와 데이터 자동저장 시스템이 부착된 펄스이온화함은 자연확산 또는 동력펌프를 통해 라돈이 포함된 공기를 전리함 내부로 유입시킨 후, 라돈의 붕괴로 생성된 이온을 전위계에서 전기적인 펄스형태로 변환시킨다. 변환된 펄스의 고정인자에 의하여 다시  $Bq/m^3$ 으로 변환된다. 이때 라돈자손은 검출기로 유입되는 과정에서 필터에 의해 걸러지고 펄스이온화함 내부에서 생성된 라돈자손은 정전기적으로 제거되어 펄스이온화함의 유효감응체적에까지 도달하지 못한다. 검출하한치(LLD)는 제조업체 또는 공급업체에 의해 주어지는데 17시간 동안 측정시  $0.7mBq/m^3$  정도이다.

#### 3) 실리콘 검출기 방식

실리콘을 이용한 연속 라돈 검출기는 용기벽과 실리콘 검출기 사이에 걸려있는 2,200V에 이르는 높은 전위차를 이용하여 용기 내부로 유입된 라돈의 붕괴로 생성된 라돈자손(양의 전하를 띤)을 실리콘 검출기 표면에서 포집하는 원리이다. 검출하한치(LLD)는 셀의 크기에 의존하며 30분간의 측정 시  $1\sim 37Bq/m^3$ 의 범위에 있다.

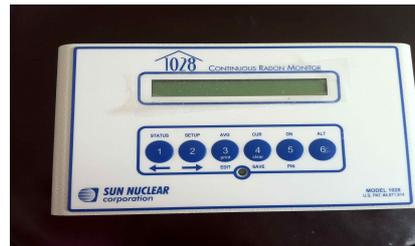
### 2.2 실험재료와 특징

본 연구에서 사용되는 라돈 농도 측정기는 연속식 라돈농도 측정기(professional continuous radon monitor)로 미국 EPA(environmental protection agency, 환경보호

청) 승인제품이다. 이 라돈농도 측정기는 실시간 연속으로 측정하며 계측은 확산-접합형 광센서를 통하여 이루어진다. 계측원리는 공기 중 라돈가스가 방출하는 알파선을 확산-접합형 광센서가 검출하는 원리이다. 검출된 수치는 저장된다. 이때 사용되는 광센서는 P-N 접합형 검출기로 P-N 접합으로 된 Diode에 역전압을 걸면 거의 전류가 흐르지 않는 공핍층이 생성되며 공핍층의 두께는  $10\sim 500\ \mu m$  이고 방사선이 공핍층에 입사하여 전자-정공쌍이 흐르면 순간 전류가 흐르고 이 전류(전하)를 수집하여 순간펄스를 측정하는 방식이다. 용도는 주로  $\alpha$ 선 측정에 이용된다. 정확도는  $\pm 5\%$  또는  $\pm 37\ Bq/m^3$ 이고 24시간이상 연속 측정 시 오차가 줄어들 수 있다(Fig 1).



(a) Continuous Radon monitor 1027



(b) Continuous Radon monitor 1028

Fig. 1. Professional Continuous Radon monitor (a), (b).

### 2.3 측정방법

각 초등학교 교실 내의 창문을 열었을 때와 창문을 닫았을 때 계측한다(Fig. 2).

직사광선이 비치거나 습도가 높은 것을 피하고 교실창문으로부터 거리를 150cm, 바닥높이 1.5m, 실내의 다른 대상물로부터 20cm로 시료채취지점을 선정하여 초등학교 건물 각 층별(1층, 2층, 3층) 오전 10시에서 오후 6시까지 총 9시간 중 창문을 열고 4시간과 창문

을 닫고 4시간으로 라돈가스 농도를 측정하였다.



(a) Opened the window



(b) Closed the window

Fig. 2. Measurement Method.

## 2.4 내부피폭 산출방법

내부피폭량을 산출하기 위하여 2차한도(보조한도)인 연간섭취한도(Annual Limit on Intake, ALI)를 계산한다. 라돈의 딸핵종을 포함한 유도공기중농도(Derived Air Cocentration, DAC)는  $1000 \text{ Bq/m}^{3[6]}$ 이다. 이때 DAC는 초등학교 교실내의 선생님과 학생 하루 8시간 주 5일 연 50주를 근무하는 것으로 계산하였다. 연간섭취한도 ALI의 계산식은 아래와 같다.

$$ALI = \frac{(\text{실제계측된 값}) \text{ Bq/m}^3}{1000 \text{ Bq/m}^3 (\text{딸핵종을 포함한 라돈의 DAC})} \times 20 \text{ mSv}$$

## III. RESULT

### 1. Professional Continuous Radon monitor 계측결과

본 연구에서 광주광역시 광산구에 소재한 42개의

초등학교 중 산업단지내의 5개 학교를 선정하여 1층, 2층, 3층 교실내의 라돈가스 농도를 계절(여름, 가을, 겨울) 및 시간별로 창문을 열었을 때와 창문을 닫았을 때 측정된 중간 결과를 보면 Table 1과 같다.

Professional Continuous Radon monitor로 측정하였으며, 총 5개 학교 중 15개 교실내의 라돈농도 측정치를 보면 총 16 pCi에서 창문을 열었을 때 6.3(0.42)pCi 였으며 창문을 닫을 때의 9.7(0.65)pCi 로 평균적으로 창문을 닫았을 때 0.23pCi가 높게 나타났다. 낮은 층의 경우 교실내의 라돈가스 농도가 높고 지상층으로 갈수록 라돈가스 농도가 낮아짐을 알 수 있다. 또한 이러한 현상은 기온, 기압, 기류 영향을 받을 것이라 예상된다. 본 연구는 라돈가스 방어에 있어서 교실내에 창문을 수시로 환기시키면 인체의 라돈에 대한 피폭이 감소되리라 본다(Table 1).

Table 1. Each floor of the five schools Professional Continuous Radon monitor Measuring concentration

초등학교 층수	층수	창문닫고 측정(단위pCi)	창문열고 측정(단위pCi)
B	1층	0.8	0.3
	2층	0.9	0.2
	3층	0.6	0.4
S	1층	0.6	0.4
	2층	0.4	0.3
	3층	0.5	0.4
J	1층	0.7	0.4
	2층	0.7	0.6
	3층	0.6	0.5
C	1층	0.8	0.5
	2층	0.7	0.6
	3층	0.4	0.4
M	1층	0.9	0.5
	2층	0.6	0.4
	3층	0.5	0.3
측정평균치	15교실	9.7(0.65)	6.3(0.42)

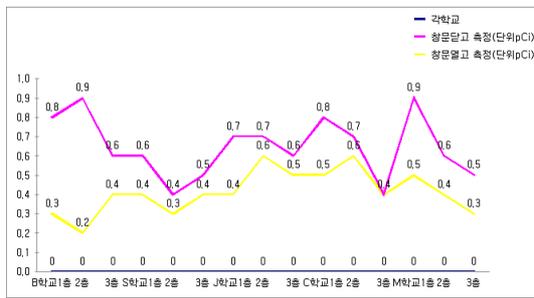


Fig. 3. Each floor of the five schools Measuring concentration distribution.

## 2. 내부피폭 산출과정과 산출 값

라돈의 딸핵종을 포함한 DAC는  $1000 \text{ Bq/m}^3$ 이며, 초등학교 1층의 평균 라돈가스량은  $28.1 \text{ Bq/m}^3$ 이다. 그러므로 초등학교 1층의 유효선량은  $0.56 \text{ mSv}$ 이다.

$$ALI = \frac{28.1 \text{ Bq/m}^3 (\text{초등학교 1층 평균 라돈가스량})}{1000 \text{ Bq/m}^3 (\text{딸핵종을 포함한 라돈의 DAC})} \times 20 \text{ mSv} \\ = 0.56 \text{ mSv}$$

Table 1은 각 초등학교(B,S,J,C,M 초등학교)의 각 층별 Professional Continuous Radon monitor를 이용한 계측 값의 평균 ALI를 계산한 것이다.

초등학교 1층, 2층, 3층 교실의 유효선량은 각각  $0.384 \text{ mSv/y} \sim 0.56 \text{ mSv/y}$ 로 지상층보다 높게 나타났으며, 이 결과로 보아 1층이 상대적으로 공기 중 라돈농도가 높은 것을 알 수 있다.

## IV. DISCUSSION

### 1. Professional Continuous Radon monitor의 계측 값에 대한 고찰

초등학교 건물 실내의 라돈농도는 계측장소와 자연 환기가 가능한 창문의 개폐 및 초등학교 선생님과 학생들의 출입에 따른 자연환기, 인공환기, 장비의 유무, 온풍기 및 에어컨의 유무 등 실질적으로 외기와 내부 공기의 흐름에 영향을 줄 수 있는 모든 행위에 의하여 좌우된다. Professional Continuous Radon monitor로 계측된 값을 분석한 결과 초등학교 건물의 라돈가스 검

출이 교실 내 그리고 국내 공기 중 라돈농도 기준치인  $148 \text{ Bq/m}^3$  및 한국 원자력 안전기술원에서 조사한 전국 공공기관 실내라돈의 전체 산술평균인  $79.3 \text{ Bq/m}^3$ 을 계측값과 비교하였을 때 초등학교 교실의 각 층에서 기준치 또는 평균치 이하로 나온 것을 알 수 있다. 또한 미국 환경청(EPA)이 제시한 라돈가스에 노출되었을 경우 흡연자 및 비흡연자의 폐암 발생 확률에 대한 리스크와 계측된 값을 비교해 보면 계측된 라돈가스 최소값인  $14.8 \text{ Bq/m}^3$ 일 때 흡연자의 경우 1000명중 3명이 폐암이 발생하고 비흡연자의 경우에는 폐암발생이 거의 없음을 알 수 있다<sup>[6]</sup>. 계측된 라돈 최고값인  $70.3 \text{ Bq/m}^3$ 일 때 흡연자는 1000명중 32명이 폐암이 발생하며 비흡연자는 4명이 폐암이 발생한다. 흡연자의 경우 담배를 끊는다면 폐암에 의한 사망률 낮아질 수 있으며 비흡연자의 경우에는 전에 담배를 피었을 경우 폐암에 의한 사망률이 높아질 수 있다<sup>[6]</sup>.

### 2. 내부피폭 산출 값에 대한 고찰

일반인이 1년에 자연방사선으로 받는 피폭은 약  $2.4 \text{ mSv}$ 이며 피폭의 원인을 파악하면 총 피폭방사선량의 약 86%는 자연방사선이며 자연방사선 중 지각선의 비중이 크며 그 중 절반에 가까운 피폭은 라돈에 의한 피폭이다. Table 1의 결과를 보면 초등학교 교실에서 측정된 라돈가스 피폭은 최소 5개의 초등학교에서 각 층별 평균치가 창문을 닫을 때의 경우 1층  $0.56 \text{ mSv}$  2층  $0.48 \text{ mSv}$  3층  $0.384 \text{ mSv}$ 이고, 창문을 열었을 때의 경우 1층과 2층은  $0.31 \text{ mSv}$ 로 수치가 같았으며, 3층은  $0.296 \text{ mSv}$ 로 측정되었다. 라돈에 대한 인체 피폭선량의 경우 1층에서 피폭이 많고 지상 3층에서는 피폭이 적었다. 창문을 닫았을 때 최대 1층에서  $0.56 \text{ mSv}$  3층에서 최소  $0.384 \text{ mSv}$ 로 자연방사선에 의한 연간피폭량에  $2.4 \text{ mSv}$ 로 최소 16%에서 23.3%를 차지하고 있다. 창문을 열었을 때 최대  $0.31 \text{ mSv}$  최소  $0.296 \text{ mSv}$ 로 연간피폭량  $2.4 \text{ mSv}$ 로 최소 12.3%에서 12.91%를 차지한다.

ICRP에서 권고하는 허용선량 기준치( $20 \text{ mSv/년}$ )를 초과하지 않는 범위<sup>[13]</sup>로 본 연구의 진행 결과값과 비교 시 권고된 선량한도의 약 1/35이하였다.

## V. CONCLUSION

본 연구에서는 초등학교 교실내의 공기 중 라돈가스 농도를 비교하였으며 측정된 값을 이용하여 연간 내부피폭량을 계산하였다. 초등학교 교실에서 측정된 라돈가스 피폭은 최소 5개교에서 각 층별 평균치가 창문을 닫을 때 1층 0.56mSv 2층 0.48mSv, 3층 0.384mSv로 측정되었고 창문을 열었을 때 1층과 2층은 0.31mSv로 수치가 같고 3층은 0.296mSv로 측정되었다. 라돈에 대한 인체 피폭 1층에서 피폭이 많고 지상 3층에서는 피폭이 적었다. 창문을 닫았을 때 최대 1층에서 0.56mSv 3층에서 최소 0.384mSv로 자연방사선에 의한 연간피폭량에 2.4mSv 최소 16%에서 23.3%를 차지하고 있다. 창문을 열었을 때 최대 0.31mSv 최소 0.296mSv로 연간피폭량 2.4mSv의 최소 12.3%에서 12.91%를 차지한다.

획득된 측정값에 따르면 실내 라돈가스에 대한 계측을 실시한 다섯 개 초등학교에서 계측한 라돈가스의 측정값은 국내라돈가스의 기준치 이하로 나타났다.

이를 바탕으로 환산한 내부피폭 또한 정상범위 내에 속한다. 그러나 방사선으로 인하여 발생할 수 있는 장애 중 확률적 장애의 경우 아무리 저선량일지라도 장애가 발생할 수 있는 점을 감안하면 잠재된 장애의 발생 확률도 줄이고자 하는 노력이 필요할 것이다. 예를 들어 간단하게 시행할 수 있는 잦은 환기 등은 성장기의 초등학교 학생 및 직업적으로 최장 시간 같은 장소를 이용하는 선생님들 및 학교관계자들에게 많은 도움이 될 것이다. 실험에 있어서 향후 더 많은 초등학교기관에 대해 라돈가스 조사가 이루어지고 그에 따른 조치를 행한다면 보다 더 안전한 초등학교건물의 시설 확립에 도움이 될 것이라 생각된다.

## Reference

[1] Sunga Kang, Sangsoo Lee, Guirack Choi, Junhaeng Lee, "Study on the Measurement of Radon concentrations in soil samples using  $\gamma$ -spectrometer", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 7, No. 1, pp. 31-36, 2012.

[2] Chulmin Lee, Yungsi Kim etc al., "Ambient Air Radon Concentraions of Characteristic in Korea", Proceedings of 29th Meeting of KOSAE, pp. 50-51, 1999.

[3] Seokyong Lee, Youngmoo Lee, Jihyun Park, Sunshin Kim, Gayeon Hong, Hogi Ahn, and Wonho Yang, "Radon Concentration Assessment of Studio Apartments surrounding a University", J. Environ Health Sci., Vol. 39, No. 2, pp. 138-143, 2013.

[4] Taewoo Kang, Myeonghan Song, Taehyoung Kim, Byunguck Chang, YoungJae Kim, et al., "A Preliminary Investigation of Radon Concentration for Some Agricultural Greenhouses in Jeju Island", Korean J. Environ. Agric., Vol. 31, No. 1, pp. 9-15, 2012.

[5] S.A. Kim, N.W. Paik, "A study on indoor radon concentrations in urban area". Journal of Korean Society for Atmospheric Environment. Vol. 28, No. 2, pp. 89-98, 2002.

[6] Jeaho Song, Gyehwan Jin, "Evaluation of Indoor Radon Levels in a Hospital Underground Space and Internal Exposure", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 5, No. 5, pp. 231-235, 2011.

[7] Sources and Effects of Ionizing Radiation, 2000, Report UNSCEAR 2000, Vol. 1, pp.1-13, 2006.

[8] Recommendations of the International Commission on Radiological Protection Publication (Korean), Vol. 103, pp.1-418, 2007.

[9] EPA Assessment of Risk from Radon in Homes(EPA 402-R-03-003)

[10] NCRP, khalidetal, 1987.

[11] U.S EPA(Environmental Protection Agency), A Citizen's Guide to Radon EP, 2009

[12] Jongryeul Sohn, et al., "The Assessment and Recognition on Indoor Air Quality at Schools in Korea", Korean J. Sanitation, Vol. 20, No. 3, pp. 1-9, 2005.

[13] Guinam Choi, Juseob Jeon, Yongwan Kim, "Radiation Exposure Dose on Persons Engaged in Radiation-related industries", Journal of the Korean Society of Radiology Vol. 6, No. 1, pp. 28-37, 2012.