

# 지리정보시스템(GIS)을 이용한 토양지질도 분포와 실내라돈 상관성 연구 : 화천 및 장수의 사례를 근거로

권명희<sup>1</sup> · 이재원 · 김성미 · 이정섭 · 정준식 · 유주희 · 이규선 · 송석환<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>국립환경과학원 생활환경연구과, <sup>2</sup>중부대학교 대학원 환경보건학과

## The Research for Relationships between Concentration of Indoor Radon and Distribution of Soil Geological Map using GIS : Based on the Hwacheon and Jangsu Areas

Myunghee Kwon<sup>1</sup> · Jaewon Lee · Seongmi Kim · Jungsub Lee · Joonsig Jung ·  
Juhee Yoo · Kyusun Lee · Suckhwan Song<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Indoor Environment and Noise Research Division, National Institute of Environmental Research

<sup>2</sup>Graduate school, Department of Environmental and Health, Joongbu University

### ABSTRACT

**Objectives:** This study examines the relationships between indoor radon concentrations and distribution from soil geological mapping in the Hwacheon and Jangsu areas.

**Methods:** GIS and a pivot table were used for inquiries about indoor radon contents, soil characteristics, and geological differences.

**Results:** The Hwacheon area was characterized by the presence of normal and reverse faults as a passage of runoff for radon, sufficient occurrences of minerals containing uranium within granite as a radon source, a high concentration of radon within the granite area and clear differences of radon concentrations between granitic and metamorphic areas. The Jangsu area was characterized by the presence of normal faults, wide distributions of alluvium, and ambiguities on radon concentrations indoors among areas of geological differences. Considering the granite area and alluvium surrounded with granite areas, the characteristics of radon concentrations within soils and indoors in the Jangsu area are similar to those of the Hwacheon area. High concentrations are found with entisol and inceptisol in the Hwacheon area, but with entisol, inceptisol, and ultisol in the Jangsu area. High radon concentrations are found in sandy loam and/or loam. High concentrations are found in recently constructed or brick buildings, but low concentrations in traditional or prefabricated houses showing a high possibility of outward flow.

**Conclusions:** The overall results suggest that radon concentrations in the Hwacheon and Jangsu area are dominantly influenced by geological characteristics with additional artificial influences.

**Key words:** artificial influences, geological differences, Hwacheon, Jangsu, radon concentration

### I. 서 론

라돈은 지질 및 주변 환경에서 발생하는 방사선 피폭원 중 하나이고, 호흡을 통해 내부 피폭으로 암을

일으키는 물질로 알려져 있어 석면과 함께 1급 발암 물질로 간주된다(IARC, 2009; EPA, 2012, 2013).

방사성 원소 중 라돈은 인간에게 피폭되는 방사선 양의 50% 이상이며, 흡연에 이어 두 번째로 높은 폐

\*Corresponding author: Suckhwan Song, Tel: 010-3409-9313, E-mail: shsong@joongbu.ac.kr

Graduate school, Department of Environmental and Health, Joongbu University, 305 Dongheon-ro, Deogyang-gu, Goyang-si, Gyeong-do  
Received: December 6, 2017, Revised: December 18, 2017, Accepted: December 19, 2017

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

암 발병인자로 잘 알려져 있다. 이 원소는 색, 냄새, 맛이 없는 기체이고, 자연에 존재하는 가장 무거운 기체이며, 일상생활에서는 감지가 어렵다(EPA, 2003). 주기율표 상에서는 헬륨(He), 네온(Ne), 아르곤(Ar), 크립톤(Kr), 제논(Xe)과 함께 비활성(noble) 기체 족으로 불리는 18족(8A족, 과거의 0족)에 속하며, 이 족의 맨 아래에 있는 원소이다(Mendelejew, 1869).

라돈(Rn)은 자연방사능 핵종으로 지각을 구성하는 암석이나 토양 중에 천연적으로 존재하는  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  및  $^{235}\text{U}$ 의 방사성 붕괴로 생성되고, 3개의 동위원소,  $^{219}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ 를 갖는다(EPA, 2007).  $^{219}\text{Rn}$ 는  $^{235}\text{U}(t_{1/2}$ 은 7.04억년)의 자연 붕괴(악티늄 계열)에서,  $^{220}\text{Rn}$ 는  $^{232}\text{Th}(t_{1/2}$ 은 140억년)의 자연 붕괴(토륨 계열)에서, 그리고  $^{222}\text{Rn}$ 는  $^{238}\text{U}(t_{1/2}$ 은 44.7억년)의 자연 붕괴(우라늄 계열)에서 유래되며, 각각  $^{223}\text{Ra}(t_{1/2}=11\text{일})$ ,  $^{224}\text{Ra}(t_{1/2}=3.66\text{일})$ ,  $^{226}\text{Ra}(t_{1/2}=1600\text{년})$ 의  $\alpha$ 붕괴로 생성된다(Kim et al., 2012). 일반적으로 라돈이라 하면  $^{238}\text{U}$ 붕괴과정에서 생성되는  $^{222}\text{Rn}$ 를 지칭하며, 실내 또는 지하공간에 유입되어 인체에 흡입될 경우 딸핵종인 폴로늄(Po)의 알파( $\alpha$ )붕괴에 의해 폐암을 일으킬 수 있다(EPA, 2007).

라돈의 방출은 다양한 근원에서 방출된다.

첫째 우리가 흔히 접촉하고 있는 건축자재 내에서 라돈은 방출된다(NIER, 2016). 건축물을 구성하는 대부분 건축 자재는 우라늄 및 라듐을 함유하고 있으며, 실내 라돈의 소스로서 지속적으로 라돈을 방출한다. 특히 일부 천연 물질 및 인공적으로 가공된 물질에서는 비교적 높은 우라늄 및 라듐을 함유 할 수 있다. 전체적으로 건축물과 실내라돈은 외부 영향을 적게 받으며, 시간에 따른 변화량이 적은 것으로 알려져 있다. 대표적인 건축 자재로 판재로 사용하는 천연석인 화강석이 있고, 인공으로 가공된 건축자재에서도 높은 우라늄 함량을 보이는 경우가 있다(Park et al., 1997; MoE 2016). 예로 자갈 및 모래를 포함하는 콘크리트 제련공정의 부산물 및 소각재를 부분적으로 이용하는 경량 골재, 화강암 대리석을 부수어 시멘트와 이겨 만든 인조석, 시멘트와 모래로 찍어 만든 벽돌, 점토질 재료를 주로 처리하여 만든 타일 등이 있다.

둘째 라돈은 지질환경 중 암석, 토양, 지하수 환경으로 방출이 가능하다(Choo et al., 2002; Moon et al.,

2009; Cho et al., 2014; Jeong et al., 2015). 지질환경에서 라돈과 같은 자연방사성물질은 주로  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ 의 동위원소로 구성되어 있다(Kim et al., 2012). 우라늄, 악티늄 및 토륨계열에 속하는 자연방사성 물질은 자연적으로 발생하는 방사능의 대부분을 차지하고 있으며, 라돈을 포함하여 인간에게 노출되고 있는 방사능의 80%이상을 차지하고 있는 것으로 보고되고 있다(EPA, 2012).

국제광물협회(International Mineralogical Association, IMA)에서는 현재까지 총 216종을 우라늄 함유 광물로 분류하고 있지만 약 218종의 우라늄 함유 광물이 존재하고 있는 것으로 알려져 있다(Gaines et al., 1997). 지질학적으로 우라늄 광물은 암석의 부성분 광물(accessory mineral) 및 우라늄 광석 광물로 산출된다. 대부분의 암석에서는 모암 중 부성분 광물로서, 미량 성분 또는 포획물로 산출되는데, 화강암체내에서 흔히 확인되는 광물로 저어콘, 모나자이트, 제노타임 등(Cho et al., 2012; Jeong et al., 2013)이 있다. 대보화강암 중 우라늄 광물은 1-2  $\mu\text{m}$  이하의 미립질 결정이고, 후방 산란 전자영상(BSE)로도 구분이 어려울 정도로 작다(Burns & Finch, 1999; Choo et al., 2002).

실내 라돈농도는 토양 중 지질분포에 따라 영향을 받으며, 일반적으로 화강암, 편마암 지질대 또는 옥천층 지대에서 라돈농도가 높은 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2012; Cho et al., 2014).

하지만 많은 연구에도 불구하고 국내의 경우 건축물의 라돈함량의 자료를 암석 및 토양을 포함하는 지질환경과 결합 시켜 해석한 자료는 많지 않다. 또한 둘 사이에 상관성이 있다면 어느 정도 지질환경이 건축물의 라돈 농도에 영향 줄 것인가에 대해서도 많은 의문의 여지가 있었다. 따라서 본 논문에서는 고농도지역으로 고려되어, 집중적으로 조사된 화천(1722호), 장수(2061호) 지역 실내 라돈 자료와 일부 토양 자료를 활용하여 이들과 지질과 연관성을 고려해 보았다(NIER, 2016). 비교 및 도시를 위해 지리정보시스템을 활용하였고, 데이터의 나열 형태에 따라서 집계나 카운트 등 계산을 하기 위해 피벗 테이블을 이용하였다. 이 결과는 암석 및 토양의 지질환경과 실내 건축물의 라돈 농도와의 관계를 이해하여, 실내 건축물내의 라돈관리를 위한 방향설정을 위한 지시자가 될 수 있으리라 사료된다.

## II. 연구방법

### 1. 연구 대상

#### 1) 화천 지역

연구지역에는 선캄브리아기의 경기편마암복합체가 기저를 이루며 중생대에 관입한 화성암류가 분포한다(Lee et al., 1974; Park et al., 1997). 편마암 복합체는 미그마타이트질 흑운모 편마암, 호상 편마암, 흑운모 편암으로 구성되어 있고, 이들은 서로 점이적 또는 단층관계로 접한다(Figure 1). 이들 변성암류를 각섬암이 관입하고, 함 석류석 화강 편마암이 최후기에 관입하여 변성되어 있다. 이들 변성암은 부분적으로 압쇄화 되어 있다. 이 암석들은 중생대 관입암 등에 의해 관입되었다. 화천 지역에는 정단층 및 역단층이 조사 대상 지역에 폭넓게 분포하고 있다. 대략 편마암 지역은 67.0%, 화강암 지역은 28.5%, 충적층 지역은 3.8%, 기타 암석 지역은 0.7%를 점유하고 있다.

라돈 광물 함유 가능성이 높은 중생대 암석으로 각섬석 반력암-섬록암 복합체, 반화강암, 반상 화강암, 복운모 화강암, 함 석류석 복운모 화강암, 염리상 화강암 등이 있다. 각섬석 반력암-섬록암 복합체는 암회색 내지 암청색을 띄며, 세립에서 조립질 암석이다. 암주상 내지 맥상으로 소규모 분포하고 복합체 내에는 주변 기반암이 포획암(xenolith)으로 산출되

도 한다. 반화강암이 맥상으로 관입하였으며, 맥상으로 관입한 반화강암 내에 반력암 내지 섬록암이 포획되어 나타나기도 한다. 반력암상은 괴상의 중립내지 조립질 조직을 보이고 각섬석, 사장석, 흑모 등을 포함한다. 섬록암상의 부분은 괴상의 중립질 조직을 보이며 사장석, 흑운모, 석영을 주로 포함한다.

반상 화강암은 암주상 관입암체로서 분포하고, 변성암류를 관입하고 복운모 화강암, 반 화강암 및 이에 수반되는 석명맥 및 페그마타이트에 의해 관입 당하였다. 조립 내지 중립질로서, 유백색을 띄며, 3 cm 크기의 알칼리 장석 거정을 갖는 특징을 보인다. 이 암석은 괴상의 반상 중립질 조직을 보이며, 사장석, 알칼리 장석, 석영, 흑운모를 주성분 광물로 포함한다.

복운모 화강암은 변성암류를 관입하는, 괴상의 중립질 암석이다. 사장석, 알칼리 장석, 석영, 흑운모, 백운모를 주로 포함한다. 함 석류석 복운모 화강암은 미그마타이트질 편마암, 호상 편마암, 반상 화강암을 관입한다. 중립 내지 조립의 등립질 암석으로 흑운모량이 극소량이고, 백운모의 특징적인 반사 현상에 의해 야외에서는 흑운모 화강암과 구분이 된다. 괴상의 입상 조직을 보이기도 하며, 사장석, 알칼리 장석, 석영, 백운모, 흑운모를 주로 포함한다.

반화강암은 호상 편마암과 함 석류석 복운모 화강암을 맥상으로 관입하는 담회색 내지 유백색의 괴상 미립

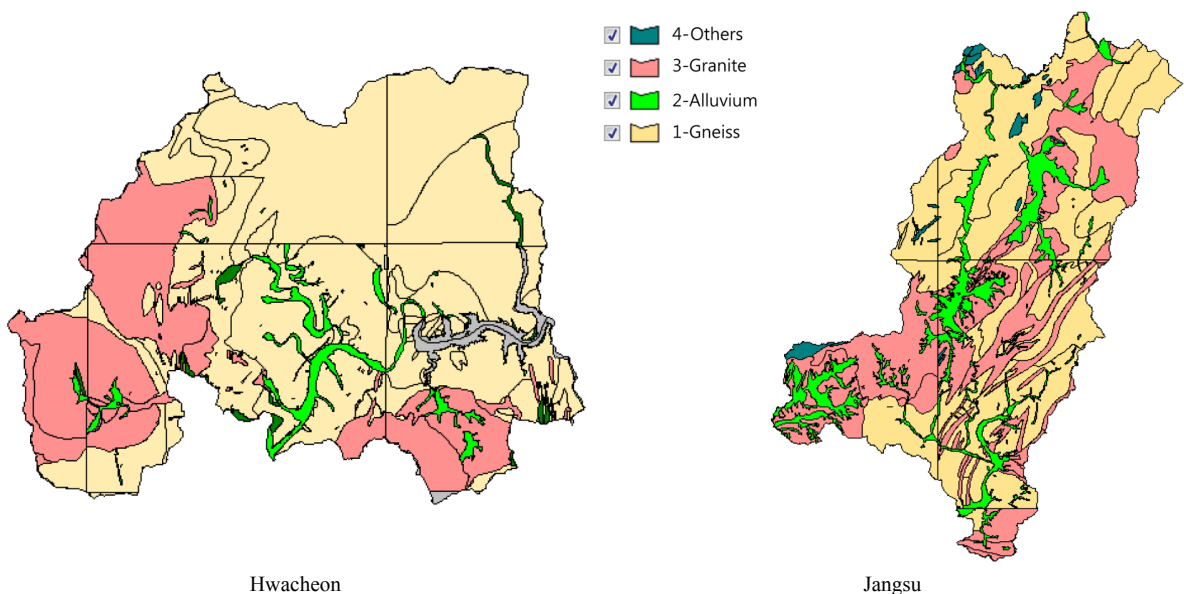
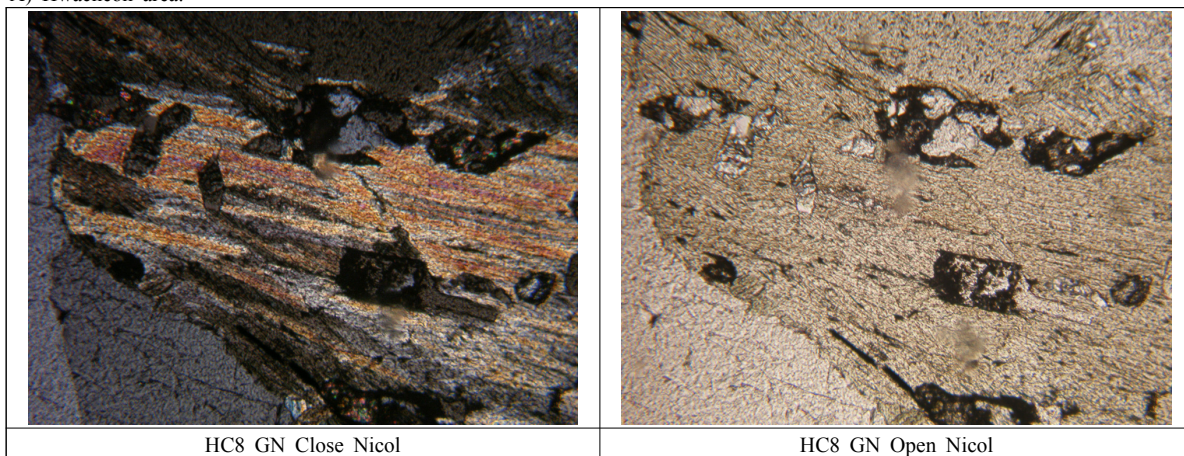
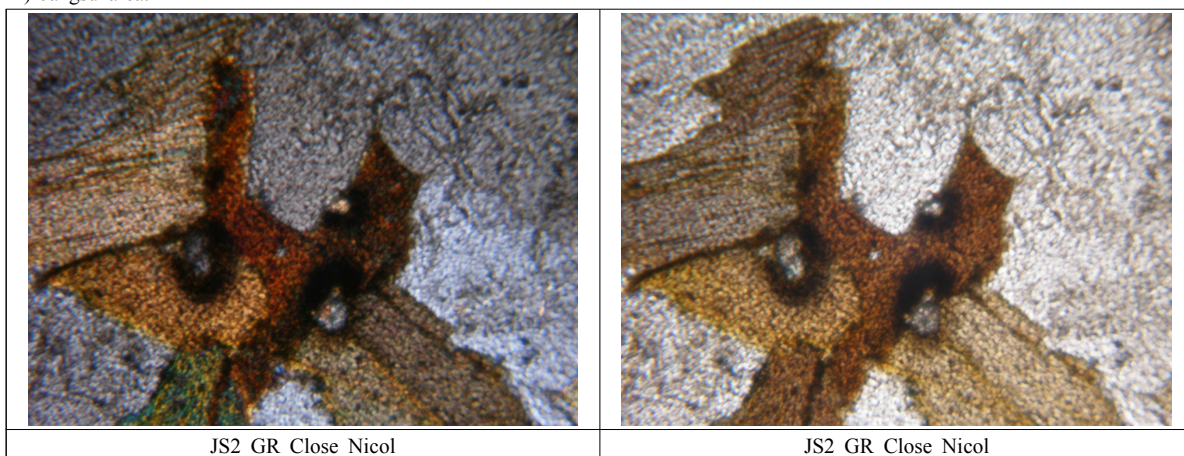


Figure 1. Simplified geological maps of Hwacheon and Jangsu area

## A) Hwacheon area.



## B) Jangsu area.



**Figure 2.** Representative photomicrographies of minerals containing uranium(Abb: HC for Hwacheon, JS; Jangsu; GN for gneiss; GR for Granite)

질 암석이다. 주상 절리가 잘 발달 되고, 치밀 견고하며 절벽을 이루거나, 산사면에 테일러스를 이룬다. 미립의 사장석, 석영, 정장석, 불투명 광물을 포함한다.

엽리상 화강암은 미립 내지 세립질 암석으로 백색 내지 회백색이다. 맥상으로 산출되거나, 버섯 모양을 이루어 평면상으로 광범위한 관입 양상을 보인다. 사장석 및 흑운모 반정을 가지며, 석영, 흑운모, 불투명 광물 등을 포함한다. 화강암은 반상 화강암과 함석류 석 복운모 화강암으로 구분된다. 페그마타이트와 석영맥이 변성암류와 화강암류를 관입하여 분포하고, 반화강암류는 최후기 관입암으로 산출된다.

즉 화천 지역은 라돈의 유출 통로로 예측되는 정단층 및 역단층이 조사 대상 지역에 폭넓게 분포하

고 있다. 대부분의 화강암류와 일부 편마암류가 라돈의 원인자인 우라늄 함유 광물인 모나자이트, 저어콘을 부성분 광물(accessory mineral)로서 포함하고 있다. 흑운모내의 우라늄함유 광물들은 흔히 방사성환을 보인다(Figure 2).

## 2) 장수 지역

선캠브리아기 편마암류와 중생대 화강암류, 그리고 퇴적암류로 구성되어 있다(Hong & Youn, 1993; Kim & Choi, 1994). 기반암체인 편마암류는 한반도 지체 구조상 선캠브리아기의 소백산 편마암 복합체의 남부 연장선이다(Figure 1). 라돈의 유출 통로로 예측되는 정단층이 조사 대상 지역의 북동부에 분포



하고 있다. 하부로부터 흑운모 편마암, 화강암질 편마암, 변성 퇴적암류, 화강 편마암, 우백질 화강 편마암, 이를 관입하는 삼엽기, 주라기 화강암류와 백악기의 화강암류 및 화산암류로 구성되어 있다. 흑운모 편마암류는 화강암화 작용에 의해 대부분이 화강암질 편마암화 되었다. 운모 편암, 석회암 등 소규모 암체들이 부분적으로 협재 되어 있다. 대략 편마암 지역은 53.9%, 화강암 지역은 28.0%, 충적층 지역<sup>1)</sup>은 10.1%, 기타 암석 8.1% 를 점유하고 있다.

라돈 광물 함유 가능성이 높은 중생대 화성암류로서 함양 화강암, 장수화강암, 각섬석 흑운모 화강암, 중립질 화강암, 육십령 화강암, 섬록암 등이 있다. 함양 화강암은 육십령 화강암에 의해 관입되어 있다. 조립질 입상 조직에 희미한 엽리를 이루기도 한다. 인접한 육십령 화강암보다 구성입자가 적고, 균질하며, 미사장석의 반정을 함유하기도 한다. 구성 광물로 석영, 카리 장석, 미사장석, 사장석, 미메르카이트, 흑운모 등이 있다.

장수화강암은 편상 화강암으로 불리던 화강암체로, 화강암보다는 후기로 추정된다. 반상 화강암에 의해 관입되고, 엽리 방향은 인접한 흑운모 편마암이나 화강 편마암과 거의 평행하다. 구성광물로 석영, 카리장석, 사장석, 흑운모 등이 있다. 각섬석 흑운모 화강암은 우백질 화강암에 관입당하였다. 조립질 입상 조직에, 희미한 엽리 구조를 보인다. 구성광물로 석영, 알카리장석, 흑운모, 각섬석 등이 있다.

중립질 화강암은 함양 화강암을 관입하고, 입상은 등립질 입상 조직이다. 반상화강암은 장수화강암을 관입하고, 조립질 입상 조직을 갖고 있는 기질에 장경 3 cm 정도의 반정을 포함하며, 부분적으로는 잘 발달된 엽리 구조를 보이기도 한다. 구성광물은 석영, 알카리 장석, 사장석, 흑운모, 각섬석 등이 있다. 육십령 화강암은 조립질 입상 조직을 이룬다. 홍색을 띠는 알카리 장석 반정을 다량 함유 한다. 구성광물로 석영, 알카리 장석, 사장석, 백운모, 흑운모, 각섬석 등이 있다.

섬록암은 육십령 화강암을 관입한다. 중립질 등립 입상 조직을 나타낸다. 구성광물로 각섬석, 흑운모 사장석 등이 있다. 화산성 각력암은 흑운모 편마암을 피복한다, 백악기의 화산성 폭발에 의해 파괴되고, 비상 하였

다가 거의 현지 근처에 집적된 것으로 예상된다. 이외에 충회암, 유문암류, 다수의 암맥류가 산출이 된다.

즉 장수 지역은 라돈의 유출 통로로 예측되는 정단층이 조사 대상 지역의 북동부에 분포하고 있다. 대부분 화강암류와 일부 편마암류에 라돈의 원인자인 우라늄함유 광물인 모나자이트, 저어콘, 인회석을 부성분 광물(accessory mineral)로서 포함하고 있다. 흑운모내의 우라늄함유 광물들은 흔히 방사성환을 보인다(Figure 2).

## 2. 연구 방법

### 1) 암석 시료 채취방법 및 지점

화천 및 장수 지역 건축물 및 토양에서 라돈 농도가 측정된 지점 및 인근 지역에 대해 수 회에 걸친 지질조사를 실시하였다. 지질조사는 지질자원연구원 에서 실시하는 방법을 따랐고, 시료 채취는 표적시료 채취 방법으로 진행하였다. 표적시료<sup>2)</sup> 채취 방법은 지질전문가가 노두에서 암석시료 채취하는 방법이다. 암석 시료는 지질햄머를 이용해서 변질가능성이 비교적 적은 신선한 부분에서 채취하였다.

### 2) 박편 제작 및 관찰

채취된 암석 중 대표적인 시료에 대해 박편을 제작하였고, 박편 관찰 결과 모암 내 광물의 종류, 조합과 라돈 함유가능물질에 대한 광학적 특성을 확인 할 수 있었다. 박편 제작은 지질학계에서 수세기 동안 관행적으로 해왔던 순서대로 진행하였다. 순서로는 암석 절단기를 이용하여 암석을 적당한 크기로 절단한 후, 한 면을 연마제(carbide powder)를 사용하여 암석 연마기로 거칠기 순서대로(# 180, 320, 600, 1500)<sup>3)</sup> 연마한다. 연마재 단계를 옮길 때마다 암석 및 광물 편을 물로 깨끗이 세척하여 전 단계의 연마재가 묻지 않게 한다. 암편의 연마가 끝나면 깨끗이 세척하여 건조한 후 암석의 연마된 면을 에폭시 수지로 슬라이드 글라스에 기포가 생기지 않도록 집착한다. 열판으로

2) 표적 시료: 표적 시료 채취 방법: 전문가가 현장에서 원하는 부분에 대해 랜덤하게 무작위로 채취하는 방법으로, 비표적 시료 채취와 같이 일정 간격 및 면적 범위에서 규칙적으로 채취하는 방법과는 명확한 차이가 있음.

3) # 180, 320, 600, 1500 : 분체의 입도 측정에 쓰이는 체의 구멍을 의미. 대개 평방 인치당의 구멍 수로 표시. 체의 mesh 와 입경과의 관계로서 4 mesh =5mm, 180 mesh=0.090 mm, 320 mesh=0.045 mm 임.

1) 충적층: 홍적세의 최후의 빙하가 퇴거하여 현재에 이르는 가장 새로운 지질 시대의 퇴적된 지층. 하천의 작용으로 퇴적된 쇄설성 퇴적물에 대한 일반 명칭을 의미하기도 함.

약 30분간 가열하여 굳힌 다음, 암석 절단기를 이용하여 2 mm이하 두께로 평행하게 절단한 후, 접착하지 않은 면을 다시 연마한다. 제작된 박편을 재물대 위에 올려놓고 광물의 종류 및 조합을 관찰하고, 현미경 상부에 있는 카메라를 이용하여, 대표적인 부분에 대해 사진 촬영을 한다.

사용될 편광현미경(Polarized Light Microscopy, PLM)은 BX51(Olympus, Japan)이고, 이 편광현미경을 이용하여, 광물의 굴절율, 다색성, 간섭색, 소광현상 등을 면밀히 관찰 한다. 화강암 및 화강 편마암 등에서 라돈 함유 광물인 인회석, 모나자이트, 저어콘 등을 확인한다.

### 3) GIS를 이용한 상관관계의 조사 · 분석

실내 라돈 자료와 토양 자료와 본 연구에서 수행한

지질조사 자료를 비교하기 위해 수치지도로 수치 지형도 및 수치지질도를 이용 하였다(NIER, 2016). 원도를 NGI Pro를 사용하여 GRS80 타원체를 UTM-K 좌표계로 변환해야 하고, Bessel 타원체로 된 지질도와 지적도는 GRS80으로 변환하고 다시 UTM-K 좌표계로 변환한다.

변환된 UTM-K 좌표계 파일은 작업의 효율성 및 컴퓨터 용량의 한계 발생으로 인한 문제점 해결을 위해 Mapinfo Professional 프로그램에 있는 Universal Translator(UT)를 이용하여 TAB 파일로 변환하고 그룹화(Table → Append Row to Table) 한다. 수치지도, 지질도, 지적도(UTM-K)는 Mapinfo Professional 이용하여 TAB 파일로 변환 후 그룹화 된 파일(수치지도, 지질도 및 지적도)을 만들어 건축물 현황과 토양조

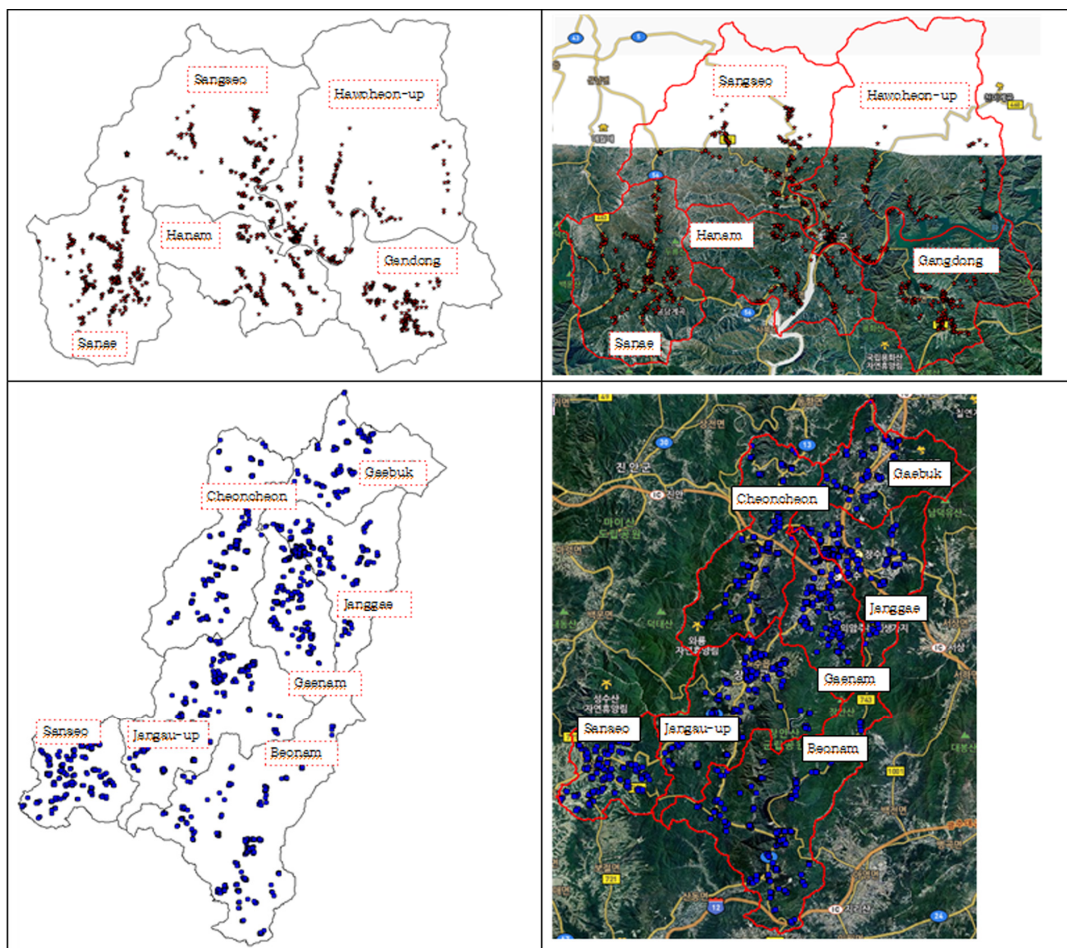


Figure 3. Location map of sampling sites for concentrations of indoor radon

사 내용, 해당 지역의 지적도, 지질도, 지형도 및 지형도를 중첩한다.

#### 4) 피벗 테이블을 활용한 데이터 분석 및 시각화 기법

피벗 테이블이란 많은 양의 데이터에서 필요한 자료만을 뽑아 새롭게 표를 작성해 주는 기능이다. 피벗 테이블은 데이터 요약, 데이터 분석 및 탐색을 하여 데이터를 표시해 주는 역할을 한다. 이를 위한 원시 데이터 조건으로 데이터의 첫 행에는 열의 머리글이 존재해야 하며 하나의 열에는 한 종류의 항목만 존재해야 한다. 문자열과 숫자는 각각 다른 열에 존재해야 하며 원본 데이터에는 부분합과 합계 값이 없어야 한다.

### III. 연구 결과

#### 1. 실내라돈 조사결과와 수치지도화

GIS를 이용, 화천의 1722호, 장수의 2061호 건축물에 대한 건축물 속성 정보의 위치를 표기 하였다(Figure 3), 화천군의 경우 다수 주택이 사내면에 위치하고, 상서면, 하남면, 화천읍의 경계선을 따라 비교적 많은 주택이 위치하였다. 장수군의 경우는 전체적으로 흩어져 분포하고 있으나 행정 구역 별 차이가 명확하지 않았다. 북북동 충적층 방향을 따라 조사 건축물이 위치하고 있다. 위성 영상 지도를 보면 건축물 대부분은 지질도상 제3기 이후 및 충적층에 위치하고 있다.

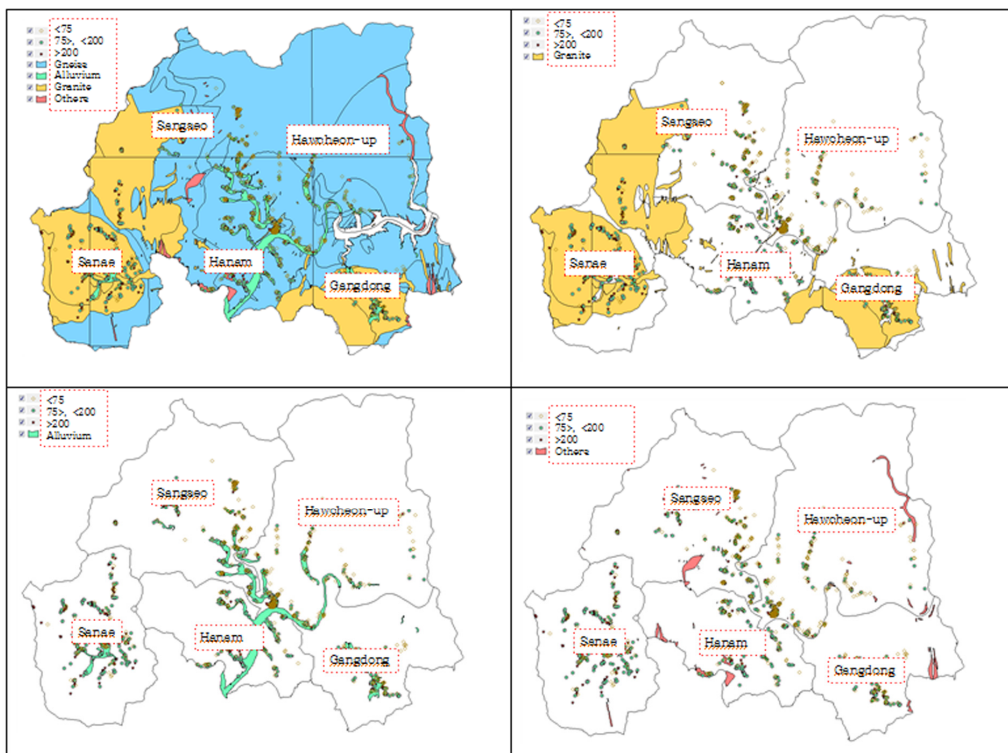


Figure 4. Concentrations of indoor radon for Hwacheon area

Table 1. Radon concentrations and numbers of buildings from the Hwacheon area

Rock Type	Bq/m <sup>3</sup>			Unclassified	Sum
	<75	75-200	>200		
Gneiss	329	291	61	0	681
Granite	108	211	162	9	490
Alluvium	154	251	129	3	537
Others	6	7	1	0	14
Total	597	760	353	12	1,722

## 2. 라돈농도 및 건축물 특성과 지질자료의 종합 및 비교/해석

### 1) 지질 차이별 건축물 내 라돈농도

화천 지역은 라돈 농도가  $75 \text{ Bq/m}^3$  이하인 건축물수가  $200 \text{ Bq/m}^3$  이상 건축물 수보다 많았다(Figure 4, Table 1). 이는 화천 지역의 주 구성 암체가 편마암 지역이기 때문이다. 암석 분포지별 건축물 수에서  $75 \text{ Bq/m}^3$

이하 값은 편마암 지역이,  $200 \text{ Bq/m}^3$  이상은 화강암 지역이 우세하였다.

이는 지질의 특성이 건물물내의 라돈 농도에 영향을 주고 있음을 암시한다. 즉 일반적으로 화강암 지역은 편마암 지역에 비해 저어콘과 같은 우라늄 함유 광물을 더욱더 포함하여 건축물내의 라돈 농도에 영향을 줄 수 있는 가능성이 크기 때문이다.

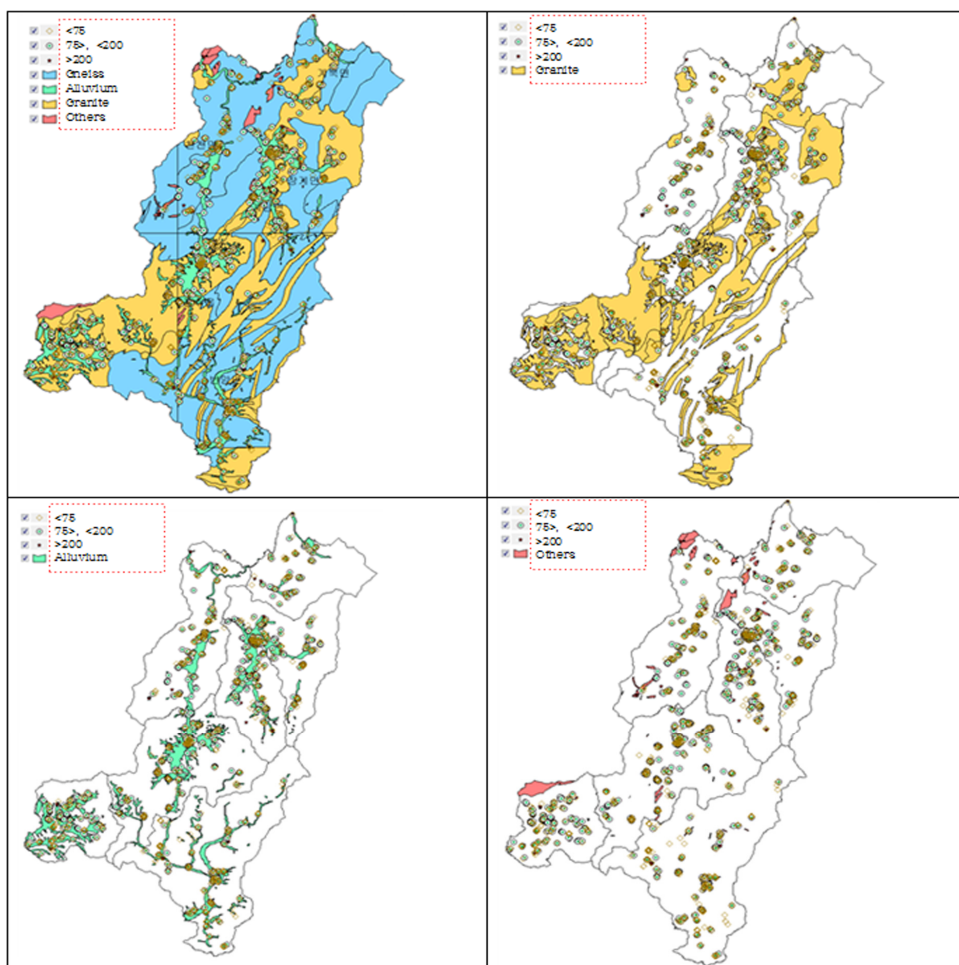


Figure 5. Concentrations of indoor radon for Jangsu area

Table 2. Radon concentrations and numbers of buildings from the Jangsu area

Rock Type	Bq/m <sup>3</sup>			Sum
	<75	75~200	>200	
Gneiss	197	165	75	437
Granite	197	218	73	488
Alluvium	337	502	293	1,132
Others	3	1	0	4
Total	734	886	441	2,061



**Table 3.** Comparisons among construction year, radon concentration and rock type, Hwacheon area

Rock Type	Construction Year	Bq/m <sup>3</sup>			Unclassified	Sum
		<75	75~200	>200		
Gneiss	<1970	45	52	13	0	110
	1970-1990	68	58	21	0	147
	1990-2000	88	104	14	0	206
	>2000	109	56	10	0	175
	unclassified(A)	19	21	3	0	43
	Sum	329	291	61	0	681
	except(A)	310	270	58	0	638
Granite	<1970	9	20	21	1	51
	1970-1990	15	43	53	5	116
	1990-2000	29	51	56	1	137
	>2000	47	79	28	2	156
	unclassified(B)	8	18	4	0	30
	Sum	108	211	162	9	490
	except(B)	100	193	158	0	451
Alluvium	<1970	22	36	24	1	83
	1970-1990	16	52	39	1	108
	1990-2000	42	88	30	1	161
	>2000	59	55	18	0	132
	unclassified(C)	15	20	18	0	53
	Sum	154	251	129	3	537
	except(C)	139	231	111	0	481
Others	<1970	0	0	0	0	0
	1970-1990	2	0	0	0	2
	1990-2000	1	1	0	0	2
	>2000	3	6	0	0	9
	unclassified(D)	0	0	1	0	1
	Sum	6	7	1	0	14
	except(D)	6	7	0	0	13
Total	except(A,B,C,D)	555	701	327	0	1,583

장수 지역은 라돈 농도가 75 Bq/m<sup>3</sup> 이하 건축물 수가 200 Bq/m<sup>3</sup> 이상 건축물 수보다 많았다(Figure 5, Table 2). 암석 분포지 별 건축물 수에서 화강암 지역 경우 라돈 농도가 75 Bq/m<sup>3</sup> 이하 값인 건축물 수가 200 Bq/m<sup>3</sup> 이상 값인 곳보다 많았다. 하지만 화강암 지역과 화강암 지역 내 층적층을 포함하는 200 이상 값 건축물 수가 편마암과 편마암 분포지 내 층적층을 포함하는 건축물의 수 보다 많아 전체적으로 화강암 지역 및 화강암에 영향을 받은 층적층 지역이 높은 라돈 농도를 보임을 암시한다. 화천군에 비해서는 두드러지지 않으나, 화강암 지역에는 모나자이트, 인회석, 일메나이트, 저어콘과 같은 함 우라늄 광물을 다수 포함하고 있다.

지구조<sup>4)</sup> 특성도 영향을 줄 수 있는데, 지층의 벽개, 단구, 단층이 그 예이다. 라돈은 지층의 파쇄면

의 틈을 따라 이동하여 건축물내로 유입되기 때문이다. 화천 지역에는 정단층 및 역단층이 조사 대상 지역에 폭넓게 분포하고 있고, 장수 지역도 정단층이 조사 대상 지역의 북동부에서 분포하고 있다. 비교적 토양 중 라돈의 함량이 낮다고 고려되는 편마암 지역의 높은 라돈 농도 수치는 이런 지구조적 현상을 반영할 수도 있음을 암시한다.

## 2) 건축 연도, 지질 차이, 건축물 라돈함량과 관계

화천 지역에서는 1970년 이전에서, 1970-1990년, 1990-2000년, 2000년 이후로 연도가 증가함에 따라 건축물수가 증가하는 경향을 보였다(Table 3). 이는 오래된 건축물은 철거 되고, 새로 건축되는 건축물 수가

4) 지구조: 구조 지질학과 동의어로 사용되기도 하지만 일반적으로 지각과 같이 큰 규모의 구조 지질이라는 의미임.

증가했음을 암시한다.

주택수가 75 Bq/m<sup>3</sup> 이하 값을 보이는 편마암 지역(329호)이 화강암 지역(108호)에 비해 많았고, 200 Bq/m<sup>3</sup> 이상 값을 보이는 수는 편마암 지역(61호)보다 화강암 지역(162호)이 많았다(Figure 6). 이는 지질학

적 특성이 건축물내의 라돈 농도에 영향을 주고 있음을 암시 한다. 화천 지역의 경우 부성분 광물로 산출되는 라돈 함유 가능 광물이 편마암체 보다 화강암 지역에서 많기 때문이다. 전체적으로 지질 차이별로 라돈 농도 차이는 명확했으나, 건축 연도와 지질차이

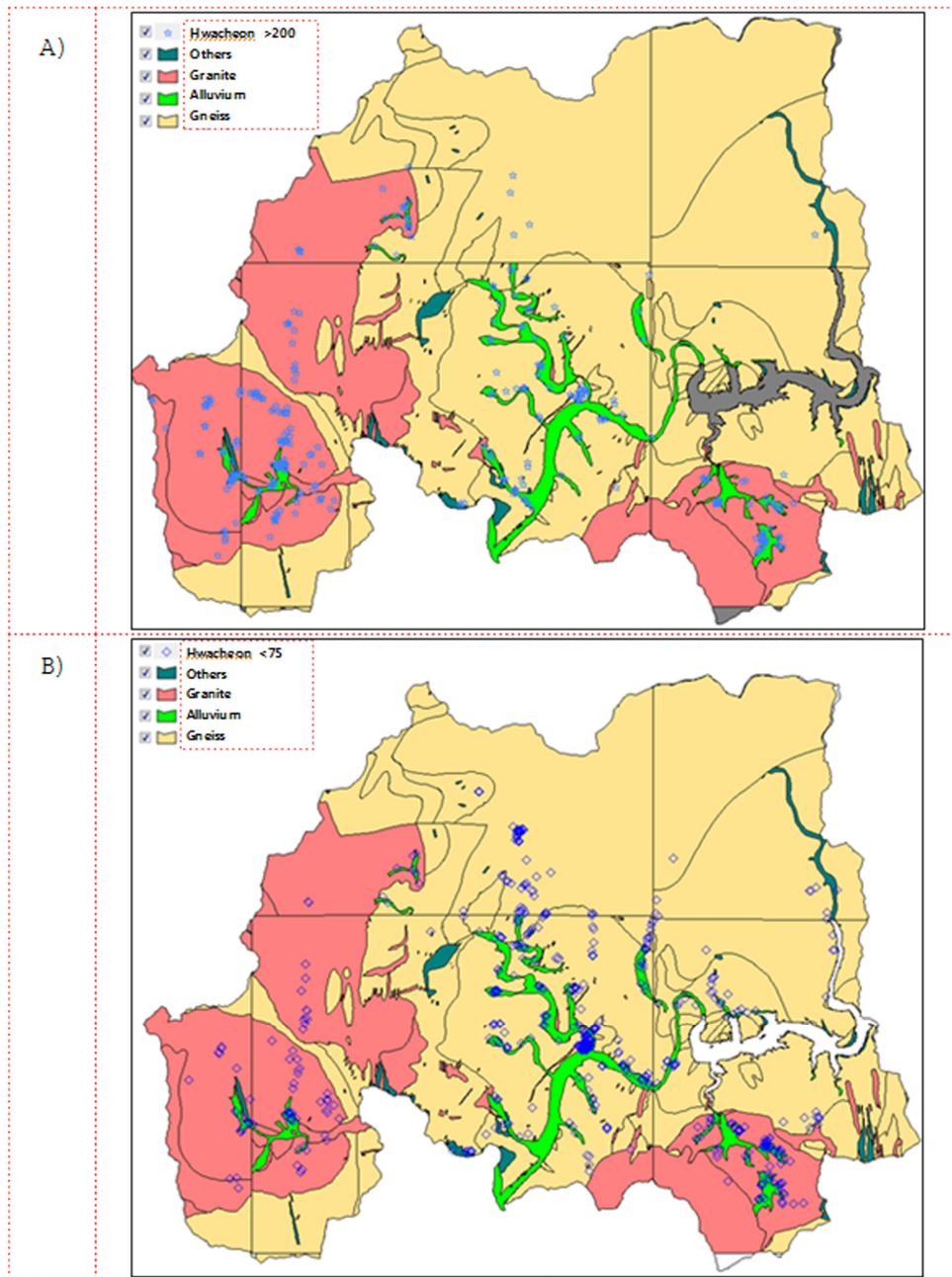


Figure 6. Map showing sites of indoor radon concentration, Hwacheon area

**Table 4.** Comparisons among construction year, radon concentration and rock type, Jangsu area

Rock Type	Construction Year	Bq/m <sup>3</sup>			Sum
		<75	75-200	>200	
Gneiss	<1970	42	27	12	81
	1970-1990	25	25	20	70
	1990-2000	55	47	23	125
	>2000	73	63	19	155
	unclassified(A)	2	3	1	6
	Sum	197	165	75	437
	except(A)	195	162	74	431
Granite	<1970	28	29	9	66
	1970-1990	36	26	20	82
	1990-2000	44	60	23	127
	>2000	82	92	17	191
	unclassified(B)	7	11	4	22
	Sum	197	218	73	488
	except(B)	190	207	69	466
Alluvium	<1970	33	54	33	120
	1970-1990	55	99	76	230
	1990-2000	80	157	122	359
	>2000	156	170	48	374
	unclassified(C)	13	22	14	49
	Sum	337	502	293	1,132
	except(C)	324	480	279	1,083
Others	<1970	0	0	0	0
	1970-1990	0	0	0	0
	1990-2000	2	0	0	2
	>2000	1	1	0	2
	unclassified(D)	0	0	0	0
	Sum	3	1	0	4
	except(D)	3	1	0	4
Total	except(A,B,C,D)	712	850	422	1,984

와는 관계가 없었고, 건축 연도와 라돈 농도는 무관했다. 장수 지역에서는 1970년 이전에서, 1970-1990년, 1990-2000년, 2000년 이후로 연도가 증가함에 따라 건축물수가 증가하는 경향을 보였다(Table 4).

이는 오래된 건축물은 철거 되고, 새로 건축되는 건축물 수가 증가했음을 암시한다. 주택 수에서 편마암 및 화강암 지역 모두, 75 Bq/m<sup>3</sup> 이하 값을 보이는 지역이, 200 Bq/m<sup>3</sup> 이상 값을 보이는 지역 보다 많았고, 화천과는 달리 총 시료수 중 축적층 지역에 해당하는 시료수가 많아 축적층 지역에 대한 해석이 요구된다(Figure 7).

전체적으로 지질차이별로 라돈 농도 차이는 명확했으나, 건축 연도와 지질차이와는 관계가 없었고, 건축 연도와 라돈 농도와는 무관했다.

### 3) 건축물이 대지와 접한 정도에 따른 라돈 농도 차이 비교

건축물이 대지로부터 떨어진 거리에 따른 차이를 현장 조사에서 정리 하였고, 이 결과를 건물 유형/라돈 농도/지질차이/건축물 건립 연도/라돈 농도와 연관시켜 비교해 보았다. GIS를 이용, 변수간 상관관계를 조사·분석하였고, 피벗 테이블을 활용, 데이터 분석을 진행하였다. 지면로부터 건축물의 이격 거리를 보여 주는 그림이 아래에 있다(Figure 8).

화천 지역에서는 건물수에서 유형 1이 우세하였다. 유형 1은 건물이 대지와 접해 있는 형태이다. 즉 토양으로부터 라돈이 방출이 있을 시 건축물 주변으로 방출됨 없이 건축물내로 그대로 유입될 수 있음을 암시하며, 이런 특징이 낮은 라돈 농도가 편마암

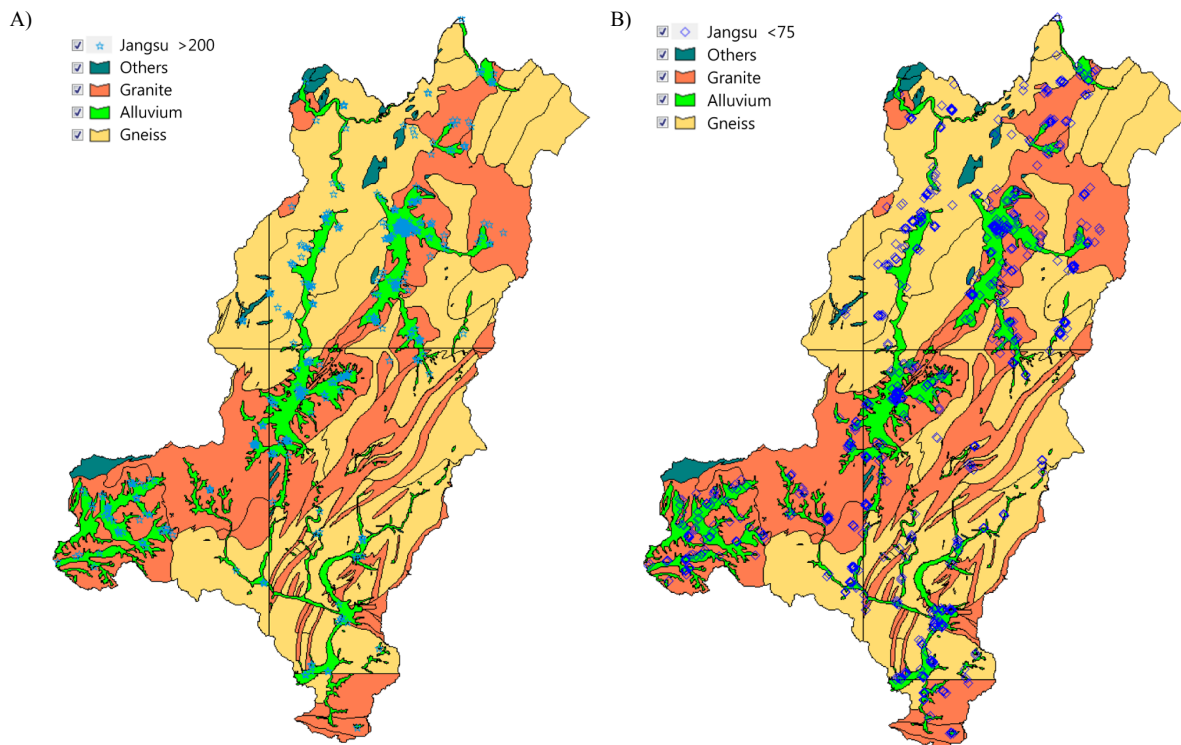


Figure 7. Map showing sites of indoor radon concentration, Jangsu area

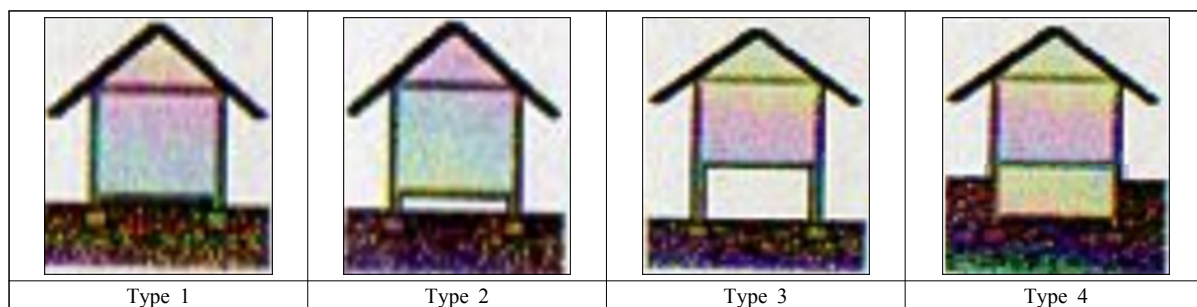
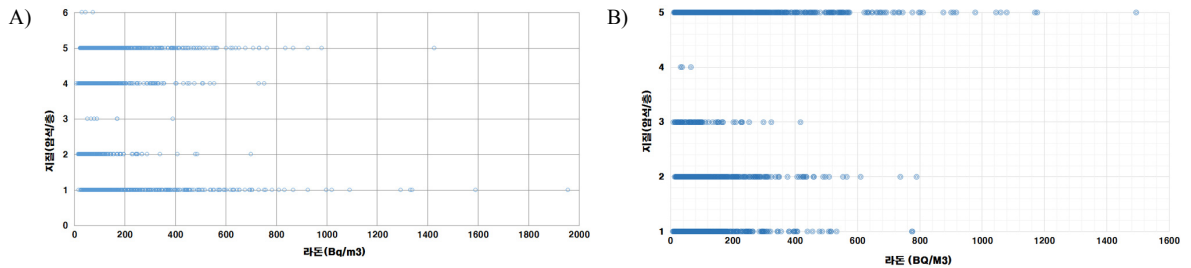


Figure 8. Differences for contacts of buildings to top soil

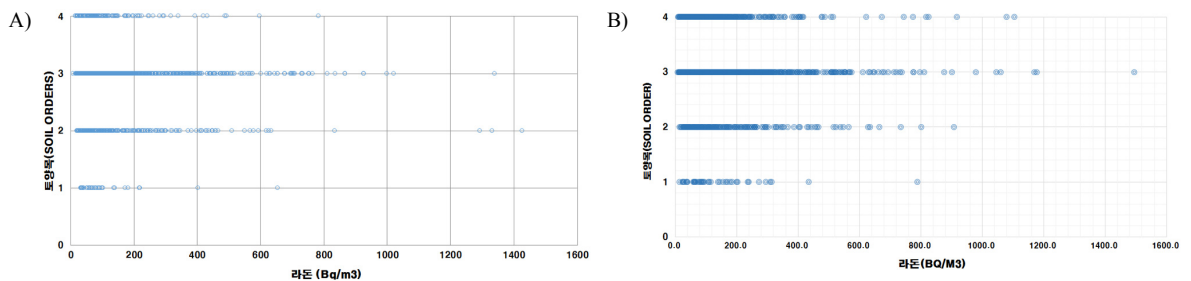
지역, 높은 농도가 화강암 지역에서 나타나게 하는 이유가 될 수 있다. 하지만 화강암 지역 중 유형 1이면서 낮은 라돈 농도를 보인다는 의미는 건축물내의 라돈 농도가 지질 차이를 반영하고 있다고 보기 보다는 건축물의 특성과 같은 다른 요인으로 해석을 해야 함을 암시한다. 편마암 지역은  $75 \text{ Bq/m}^3$  이하 값 또는  $200 \text{ Bq/m}^3$  이상 값에 관계없이 유형 1이 제일 우세하였다. 유형 1은 건축물이 대지와 접해 있는 상황으로 지중의 라돈 농도가 직접적으로 건축물에 유입될 개연성이 큼을 암시한다.

장수 지역에서는 건물수에서 유형 1이 우세하였고, 유형 2, 3순서로 감소하였다. 유형 1 건물은 대지와 접해 있는 형태이다. 즉 토양으로부터 라돈이 방출이 있을 시 건축물 주변으로 방출됨 없이 건축물 내로 그대로 유입될 수 있음을 암시하며, 라돈 기체에 대한 외부로의 방출이 없다면, 특정 지역의 라돈 농도는 지질의 영향을 받을 수 있음을 암시한다. 장수 지역은 제3기 및 4기 충적층이 화천보다 넓게 분포하여 화천과는 다른 해석이 필요하다. 건축물 수에서 화강암 지역 및 화강암에 영향을 받는 충적층 지





**Figure 9.** Relationships between geology and indoor radon, Hwacheon and Jangsu area(For Hwacheon(A) 1; granites, 2;gneiss, 3; gabbro, 4; schist, 5: alluvium, 6;amphibolite, For Jangsu(B) 1; granites, 2;gneiss, 3; diorite, 4; metasediment and dykes, 5: alluvium, 6;amphibolite)



**Figure 10.** Relationships between geology and soil order, Hwacheon and Jangsu area(For Hwacheon(A) 1. Alfisol, 2. Entisol, 3. Inceptisol, 4. Ultisol, For Jangsu(B) 1. Alfisol, 2. Entisol, 3. Inceptisol, 4. Ultisol)

역에서 건축물의 수가 많고, 이들 지역은 지질의 특성을 반영하여 건축물내의 라돈 농도가 편마암 지역보다 높을 수 있음을 암시한다. 편마암 지역의 경우는 각 연도별 라돈 농도가 증가함에 따라 라돈 농도가 증가하는 건축물수가 감소하는 경향을 보여 지질 특성을 반영하는 것으로 예측된다.

전체적으로 지질 암상의 차이와 건축물내의 라돈 농도는 부분적인 연관성을 보였으나, 라돈 농도와 건축물의 유형, 건축 연도와는 뚜렷한 연관성이 없었다. 암상, 건축물 유형, 건축 연도에 관계없이 유형 1이 우세하였고, 유형 2, 3순 이었다. 유형 1은 건축물이 대지와 접해 있는 상황으로 지중의 라돈 농도가 직접적으로 건축물에 유입될 개연성이 큼을 암시한다. 따라서 지질 특성 차이를 많이 반영할 수 있음을 암시한다.

#### 4) 토양별 건축물 내 라돈 특성

실내 라돈과 암석의 종류와 상관관계의 비교 (Figure 9)에서 화천군의 경우 화강암 지역에서 실내 라돈 농도의 최대값이 높게 나타났으며, 충척층 및 편마암류 층에서 실내 라돈 농도의 값이 높게 확인

되었다. 장수군의 경우 충척층에서 실내 라돈 농도가 최대값을 나타냈으며, 화강암류, 편마암류에서 실내 라돈 농도의 값이 높게 확인되었다.

실내라돈과 토양<sup>5)</sup> 종류와 상관관계의 비교 (Figure 10)에서 화천군의 경우 엔티졸에서 실내 라돈 농도의 최대 값을 나타냈으며, 일반적으로 엔티졸·인셉티졸에서 겨울철 실내 라돈 농도의 값이 높게 확인되었다. 엔티졸은 토양층이 발달되지 않은 토양으로서 모든 기후에서 생성된다. 인셉티졸은 토양층의 발달이 미약한 초기의 토양으로서 용탈작용과 변질작용을 많이 받지 않은 것이 특징이다. 장수군의 경우 인셉티졸에서 실내 라돈 농도의 최대값을 나타냈으며, 일반적으로 엔티졸·인셉티졸·울티졸에서 겨울철 실내 라돈 농도의 값이 높게 확인되었다.

실내라돈과 토성<sup>6)</sup>과 상관관계의 비교(Figure

- 5) 토양 목: 전세계 토양을 12개 목으로 분류. 이를 토양 분류 체계라 하며 목(order), 아목(suborder), 대군(greatgroup), 아군(subgroup), 속(family), 통(series)의 6단계로 구성. 한국의 목에 해당하는 토양으로 엔티졸, 인셉티졸, 울티졸 등이 있음.
- 6) 토성: 토양의 무기 입자를 모래, 미사 및 점토로 구분하고 이들의 함양비, 즉 입경 조성에 따라 결정되는 토양의 종류

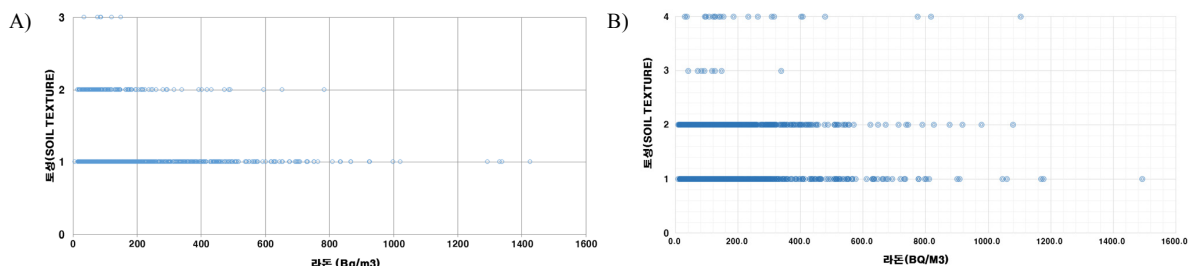


Figure 11. Relationships between geology and soil order, Hwacheon and Jangsu area(For Hwacheon(A) 1. Sandy loam, 2. Loam, 3. Silt loam, For Jangsu(B) 1. Sandy loam, 2. Loam, 3. Silt loam, 4. Silty clay loam)

Table 5. Radon concentrations(Av) for soils and indoors from Hwacheon area

Rock Type	Building	Soil			
	Radon(Bq/m³)	Radon(Bq/m³)	Ra-228(Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)	U (mg/kg)
Granite	149.1963	24,956.51	81.46553	738.6015	3.013087
Gneiss	80.83612	13,042.38	71.53198	718.52	2.797182
Alluvium	109.9767	13,273.05	74.91166	865.7466	3.732384

Table 6. Radon concentrations for soils and indoors at alluvium area surrounded by gneiss area, Hwacheon area

Sample Number	Contact Type	Land Registration	Building	Soil				
			Radon (Bq/m³)	Radon(AV *.)(Bq/m³)	Ra-226 (Bq/kg)	Ra-228 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)	Uranium (mg/kg)
28255	1	Earth	139.8178	3,652.5	45.0	77.0	591	3.17
28260	2	Field	24.6928	4,328.8	31.6	65.0	566	2.31
28273	4	Field	23.15753	8,692.3	22.1	63.8	495	1.64
28286	1	Field	138.2321	18,423.1	50.4	57.8	980	3.75
28296	1	Earth	100.9537	9,579.4	66.2	98.4	1211	5.81
Average			85.37077	8,935.22	43.0479	72.39299	768.6246	3.334091

\* AV. for Average

11)에서 화천군의 경우 사양토에서 실내 라돈 농도의 최대 값을 나타냈으며, 일반적으로 양토에서 겨울철 실내 라돈 농도의 값이 높게 확인되었다. 장수군의 경우 사양토에서 실내 라돈 농도의 최대값을 나타냈으며, 일반적으로 양토에서 겨울철 실내 라돈 농도의 값이 높게 확인되었다. 두 지역 모두 모암으로부터 풍화가 덜 되어 있는 토양층으로, 2 차적인 광물의 생성이 적은 지역으로 공극이 많은 토양층이다. 이 결과 높은 라돈 농도를 보인 것으로 예측이 된다.

##### 5) 토양 함량과 건축물의 라돈 농도의 비교

대표적인 토양 시료의 측정치를 건축물과 비교 해 보았다. 토양 내 라돈 농도에서 화천지역의 경우

를 토성이라 함. 식토, 양토, 사양토, 미사토 등이 있음.

(Table 5,6,7) 화강암 지역은 편마암 지역 보다 높았고, 충적층 지역은 중간값을 보였다. 기타 원소 Ra-228, K-40, U 함량 평균 값에서 화강암 지역이 편마암 지역 보다 높았다. 충적층 지역은 뚜렷한 특성을 보이지 않았다. 전체적인 라돈 및 기타 원소 농도 특징이 화강암 및 편마암의 경우 지질 특성을 반영하는 것으로 예상되고, 충적층은 풍화 차이에 따른 토양의 차이 또는 지형적인 저지대 특성상 이질물의 이동의 이동으로 해석이 가능 할 수 있다.

토양 시료가 채취된 대지의 건축물 중 평균 라돈 농도는 화강암 지역이 편마암 지역 보다 높았으나, 충적층 지역은 중간 값을 보였다. 이는 화천 건축물 중 라돈의 평균값 농도 특징은 화강암 및 편마암의 경우 지질의 특성을 반영하는 것으로 고려된다.

**Table 7.** Radon concentrations for soils and indoors at alluvium area surrounded by granite area, Hwacheon area

Sample Number	Contact Type	Land registration	Building	Soil				
			Radon (Bq/m <sup>3</sup> )	Radon(AV <sup>*</sup> .) (Bq/m <sup>3</sup> )	Ra-226 (Bq/kg)	Ra-228 (Bq/kg)	K-40 (Bq/kg)	Uranium (mg/kg)
28306	1	Earth	167.9896	15,898.2	40.0	74.6	1030	4.43
28308	1	Earth	74.75174	13,716.0	49.4	93.1	990	3.50
28309	1	Earth	146.507	24,806.4	34.1	69.5	1012	2.76
28310	1	miscellaneous	173.688	20,360.7	43.8	75.0	916	6.23
Average			140.7341	18,695.34	41.82044	78.05999	987.1491	4.23025

\* AV. for Average

**Table 8.** Radon concentrations for soils and indoors with petrology

Rock Type	Radon con. of soil (Bq/m <sup>3</sup> )	No. of Building(Bq/m <sup>3</sup> )			Sum
		<75	>75, <200	>200	
Granite	<10,000	2	3	2	7
	>10,000	3	5	1	9
	Sum	5	8	3	16
Gneiss	<10,000	7	4	0	11
	>10,000	6	3	1	10
	Sum	13	7	1	21
Alluvium	<10,000	2	2	0	4
	>10,000	1	4	0	5
	Sum	3	6	0	9
Total		21	21	4	46

건축물과 토양 내 라돈 농도 평균값 비교(Table 8)에서 화강암 지역이 편마암 지역 보다 높은 것은 지질의 특성을 반영하는 것으로 예측이 된다. 하지만 각각의 토양과 건축물내의 라돈 농도를 고려 해보면 토양 중 라돈 농도의 높고 낮음이 건축물 내의 라돈 농도의 높고 낮음이 항상 유사하지 않음을 암시한다. 이 결과는 건축물의 특성은 대기 중으로 방출되는 과정의 지질 및 인위적인 변수 등의 고려가 필요함을 암시한다. 지구조적으로 화천 지역은 라돈의 유출 통로로서 추정되는 정단층과 역단층이 넓게 분포하여, 이들도 건축물내의 라돈 농도에 영향을 주었을 것으로 예상된다.

토양 내 라돈 농도에서 장수지역의 경우(Table 9,10) 토양 중 라돈 농도(평균값)에서 화강암 지역은

편마암 지역보다 낮았고, 충적층 지역은 둘 사이에서 중간값을 보였다. 장수의 라돈의 토양 평균값 특징은 화강암 및 편마암의 경우 지질특성 외의 다른 변수들을 반영하는 것으로 예상된다. 하지만 충적층은 화천의 경우와 같이 풍화 차이에 따른 토양의 차이 또는 지형적으로 저지대 특성상 이질 퇴적물의 이동 탓으로 해석이 가능 할 수 있다.

기타 Ra-228 함량은 화강암 지역이 편마암 지역 보다 낮았으나 K-40, U 함량에서 화강암 지역이 편마암 지역 보다 높았다. 충적층 지역은 모든 값에서 화강암, 편마암보다 낮은 값을 보였다. 장수의 토양 중 라돈 및 기타 원소 농도 특징이 지질의 특성을 반영할 수도 있지만, 그 외의 측정 수, 측정 지점의 토양 특징, 측정 시 환경 등 의 다른 변수들이 있을 수

**Table 9.** Radon concentrations(Av) for soils and indoors from Jangsu area

Rock type	Building	Soil			
	Radon(Bq/m <sup>3</sup> )	Radon(Bq/m <sup>3</sup> )	Ra-228(Bq/kg)	K-40(Bq/kg)	U(mg/kg)
Granite	140.71	18,376.00	61.55	726.73	1.79
Gneiss	94.38	26,737.32	62.86	706.38	1.72
Alluvium	179.76	21,241.24	47.42	499.16	1.55

**Table 10.** Radon concentrations for soils and indoors and contact face with top soil, Jangsu area

Rock Type	Contact Type	Building	Soil				
		Radon(Bq/m <sup>3</sup> )	Radon(Bq/m <sup>3</sup> )	Ra-226(Bq/kg)	Ra-228(Bq/kg)	K-40(Bq/kg)	Uranium(mg/kg)
Granite	1	140.71	18,376.00	31.58	61.55	726.73	1.79
Gneiss	1	99.03	28,576.16	47.03	63.03	722.42	1.80
	3	38.60	6,510.12	26.20	60.80	514.00	0.76
Alluvium	1	187.32	32,333.34	41.00	68.68	686.05	2.04
	2	450.72	19,307.50	43.40	61.07	715.33	2.25

**Table 11.** A summary of radon concentrations for soils and indoors, Jangsu area

Rock Type	Radon Range (Bq/m <sup>3</sup> )	Num. Building(Bq/m <sup>3</sup> )			Sum
		<75	>75, <200	>200	
Granite	<10,000	0	4	2	
	>10,000	2	1	0	
	Sum	2	5	2	9
Gneiss	<10,000	3	0	0	
	>10,000	5	4	0	
	Sum	8	4	0	12
Alluvium	<10,000	0	2	1	
	>10,000	4	10	7	
	Sum	4	12	8	24
Total		14	21	10	45

있음을 암시한다.

토양 시료가 채취된 대지의 건축물 내의 평균 라돈 농도 비교(Table 11)에서 화강암 지역은 편마암 지역보다 높았고, 충적층 지역은 두 지역 보다 높은 값을 보였다. 이는 장수의 건축물 중 라돈의 평균값 특징은 화강암 및 편마암의 경우 지질의 특성을, 반

영하는 것으로 생각이 든다.

각각의 토양과 건축물과의 관계에서 명확한 비교가 나타나지는 않았는데, 이는 조사 대상 지점의 한계도 있었지만. 그 외의 측정 수, 측정 지점의 토양 특징, 측정 시 환경 등의 다른 변수들이 있을 수 있음을 암시한다.



#### 6) 인위적 요인 차이에 의한 건축물 내 라돈의 함량 차이

화천 및 장수 지역 모두 전체적으로 상, 하위 라돈 농도를 보이는 대표적인 화천군 및 장수군의 건축물의 현장 조사 결과 지질의 특성에 관계없이 건축물 중 새로 지은 붉은 벽돌집은 모두 높은 라돈 농도를 보였고, 전형적인 농촌 주택 또는 가건물들은 모두 낮은 라돈 농도를 보임을 확인했다. 비교적 높은 값을 예상했던 화강암 지역내의 농촌 주택 또는 가건물들은 낮은 값을, 낮은 값을 예상했던 편마암 지역내의 새로 지은 붉은 벽돌집은 높은 값을 보였다. 이는 지질 변수외의 다른 인위적인 변수들을 재고할 필요가 있음을 암시한다.

### IV. 고 찰

기존의 국내, 외 연구들은 토양 중 라돈 농도가 지질 특성을 반영할 수 있음을 암시해 주고 있다(Je et al., 1998; 2014; Jeong et al., 2016). 지질학적으로 보면 암석 내 라돈 방출 광물들이 존재하고 기체인 라돈의 암석 및 토양 중의 유입 통로를 따라 이동하기 때문이다(Moon et al., 2009).

광물학적 특성에 대한 연구들은 토양 및 암석 내에서의 유라늄 함유 광물의 존재와 포함된 함량이 암석마다 차이가 있음을 보여 주고 있고, 이 결과 토양 중 라돈 농도에서 차이가 있음을 암시해 주고 있다(Kim et al., 2012; Kim et al., 2014; Park et al., 2014; Jeong et al., 2016). 유입통로서 라돈의 연구들은 라돈의 유입 통로로 단층의 존재가 토양 중 라돈 농도에 영향을 주고 있음을 보여 주고 있다(Giammanco et al., 2009; Lombardi & Voltattorni, 2010). 이 결과들은 단층의 존재가 확인된 지역 토양에서의 라돈 농도는 인접 지역에 비해 두드러진 차이를 보이고 있음을 암시해주고, 풍화 정도에 따라 토양의 입자 크기가 차이를 보이며, 건축물내로 방출되는 라돈의 함량에 영향을 줄 수 있음을 보여 주고 있다.

본 과제에서 화천 및 장수의 건축물 내 라돈함량을 지질측면에서 접근해 보았다.

화천 및 장수의 대표적 지역에 대한 현장 조사 결과에서 건축물내의 라돈 농도는 지질 특성의 영향을 받을 것이고, 건축물내의 특성, 즉 기체로서 라돈이 잘 누수

될 수 있는가도 건축물내의 라돈 농도에 영향을 줄 것임을 보여 주고 있다. 토양 중 화천의 라돈 농도(평균값) 특징은 화강암 및 편마암 지역 지질 특성을 반영하는 것으로, 박편 관찰 결과 높은 우라늄 함량을 보이는 광물이 편마암 보다 화강암체내에서 많이 발견되는 특성과 일치한다고 볼 수 있다. 하지만 층적층의 평균 함량 특징은 풍화에 따른 토양의 특성 차이 또는 지형적으로 저지대 특성상 이질 퇴적물의 이동 탓으로 추가적인 해석이 필요 할 수 있다.

기타 Ra-228, K-40, U 함량에서 화강암 지역이 편마암 지역 보다 높았으나, 층적층 지역은 명확하지 않았다. 이는 화천의 라돈 및 기타 원소 함량 특징이 화강암 및 편마암의 경우 지질의 특성을 반영하는 것으로 예상되고, 층적층은 풍화 차이에 따른 토양의 차이 또는 지형적인 저지대 특성상 이질물의 이동의 이동으로 해석이 가능 할 수 있다. 각각 건축물과 건축물이 위치한 토양내의 라돈 농도 관계에서 명확한 특성이 나타나지는 않았는데, 이는 지질 특성외의 다른 변수들이 건축물보다는 토양 중의 라돈 농도에 영향을 주고 있음을 암시한다.

장수의 토양 중 라돈 농도에서 화강암 지역은 편마암 지역 보다 낮았으나, 층적층 지역은 둘 사이에서 중간값을 보였다. 이 지역은 넓은 층적층으로 이들 층적층 대부분은 화강암 및 편마암 지역에 둘러싸여 있다. 즉 토양 중 라돈 및 기타 원소 함량 특징이 지질의 특성을 반영할 수도 있지만, 그 외 여러 다른 변수들이 있음을 암시한다. 또한 각각 건축물과 건축물이 위치한 토양내의 라돈 농도 관계는 불명확하고, 시료수, 토양의 토성 등과 같은 그 외의 변수들이 토양 중 함량에 영향을 주고 있음을 암시한다.

또한 암석의 종류에 관계없이 단층의 존재가 라돈의 함량에 영향을 줄 수 있음을 암시한다. 특히 정단층이 제한적으로 존재하는 장수 지역 보다 정단층 및 역단층이 전 지역에 넓게 분포하는 화천 지역이 더욱더 토양 중 라돈의 방출정도에 영향을 줄 수 있음을 암시한다.

하지만 이런 지질학적 특성 외에도 부분적으로 인위적인 특성들이 건축물내의 라돈 농도에 영향을 줄 수 있음도 확인 되었다.

화천 및 장수 지역지질의 특성에 관계없이 건축물 중 새로 지은 붉은 벽돌집은 모두 높은 라돈 농도를

보였고, 전형적인 농촌 주택 또는 가건물들은 모두 낮은 라돈 농도를 보임을 확인했다. 비교적 높은 값을 예상 했던 화강암 지역내의 농촌 주택 또는 가건물들은 낮은 값을, 낮은 값을 예상했던 편마암 지역내의 새로 지은 붉은 벽돌집은 높은 값을 보였다. 이는 지질 변수와의 다른 인위적인 변수들을 재고할 필요가 있음을 암시한다.

## V. 결 론

다양한 지질학적 영향 등이 건축물내의 라돈 농도에 영향을 줄 수 있음을 암시하고 있다. 부수적으로 인위적인 요인들도 건축물내의 라돈 농도에 영향을 줄 수 있음을 암시하고 있다. 연구 결과는 아래와 같다.

첫째 건축물 내 라돈 농도는 라돈의 근원자인 우라늄 함유 광물을 포함하는 암석의 존재 및 암석내의 우라늄 함유 광물의 함량 차이, 기체로서 라돈의 유입 통로로 고려 가능한 단층의 존재에 영향을 받을 수 있음을 GIS 시스템 및 통계 처리를 통해 확인 하였다.

둘째 건축물의 대부분은 지표면에 접해 있는 유형 1이다. 건축물이 대지와 접한 정도에 따라서도 지질에 의한 변수 또는 인위적인 변수들에 영향을 주어, 지중에서의 건축물 내부로의 라돈 가스 방출 정도에 영향을 줄 수 있음을 암시한다.

셋째 실내 라돈과 토양목 종류 및 실내라돈과 토성 종류와 같은 토양의 특성 또한 토양 중에서 방출되는 라돈 가스 농도에 영향을 주고 있음을 확인 하고 있다. 두 지역 모두 토양층이 발달되지 않았거나 미약한 초기의 토양이고, 따라서 사양토 및 양토이다.

넷째 상, 하위 라돈 농도를 보이는 대표적인 화천군 및 장수군의 건축물에 대한 현장 확인 결과는 건축물 내 라돈 농도는 적어도 지질 변수 외에 다양한 건축물의 상황에 따라 인위적인 영향을 받음을 암시한다.

위 결과들은 적어도 특정 지역의 건축물에 대한 라돈 농도의 조사를 위해서는 지질과의 연관성을 고려해 보고, GIS 시스템 및 현장 방문을 통해, 건축물의 상황을 확인 해 볼 필요가 있음을 강하게 암시한다.

## References

- Burns PC, Finch RJ. Uranium: mineralogy, geochemistry and the environment. Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America 1999;38: 679p
- Cho BW, Choo CO, Yun U, Lee BD, Hwang JH et al. Hydrogeochemical Characteristics, Occurrence, and Distribution of Natural Radioactive Materials (Uranium and Radon) in Groundwater of Gyeongnam and Gyeongbuk Provinces. J Engineering Geology 2014; 24(4):551-574
- Cho BW, Kim MS, Kim TS, Han Jk, Yun U et al. Hydrochemistry and Distribution of Uranium and Radon in Groundwater of the Nonsan Area. J Engineering Geology 2012;22(4):427-437
- Choo CO. Characteristics of uraniferous minerals in Daebogranite and significance of mineral species. J Mineral Soc Korea 2002; 15: 11-21
- EPA. A citizen's guide to radon, U.S. EPA 402-K-07-009. 2007
- EPA. Report to Congress: Radon in Drinking Water Regulations, EPA 815-R-12-002. 2012
- EPA. Basic radon facts. The U.S. surgeon general recommends all homes be tested for radon gas. EPA 402/F-12/005/February. 2013
- Gaines RV, Skinner HC, Foord EE, Mason B, Rosenzweig A et al., Dana's new mineralogy. Eighth edition New York, John Wiley & Sons, 1997;1872p.
- Giammanco S, Imme G, Mangano G, Morelli D, Neri M. Comparison between different methodologies for detecting radon in soil along an active fault: the case of the Pernicana fault system, Mt. Etna (Italy). Appl Radiat Isot 2009;67(1): 178-185
- Hong SH, Yun W. Geological report of the Changkye sheet. 1:50000 Korea Institute of Geology Mining and Materials 1993
- IARC. Strengthens its findings on several carcinogenic personal habits and household exposures. List of IARC group 1 carcinogens. 2009
- Je HK, Kang CG, Chon HT. A preliminary study on soil-gas  $^{222}\text{Rn}$  concentrations depending on different bedrock geology. Econ Environ Geol 1998;31(5):415-424
- Jeong CH, Lee YJ, Lee YC, Kim MS, Kim HK et al. Hydrochemistry and Occurrences of Natural Radioactive Materials from Groundwater in Various Geological Environment. J Engineering Geology 2016; 26(4):531-549
- Jeong CH, Ryu KS, Kim MS, Kim TS, Han JS et al. Geochemical Occurrence of Uranium and Radon-222 in Groundwater at Test Borehole Site in the Daejeon area. J Engineering Geology 2013;23(2):171-186
- Jeong CH, Yang JH, Lee YJ, Lee YC, Choi HY et al.

- Occurrences of Uranium and Radon-222 from Groundwaters in Various Geological Environment in the Hoengseong Area. *J Engineering Geology* 2015; 25(4):557-576
- Kim JS, Kim SW, Lee HM, Choi JY, Moon KH. Characteristics of Radon Variability in Soils at Busan Area. *Econ Environ Geol* 2012;45(3):277-294
- Kim KB, Choi UH. Geological report of the Hamyang sheet. 1:50000. Korea Institute of Geology Mining and Materials 1994
- Kim MS, Yang JH, Jeong CH, Kim HK, Kim DW et al. Geochemical Origins and Occurrences of Natural Radioactive Materials in Borehole Groundwater in the Goesan Area. *J Engineering Geology* 2014;24(4): 535-550
- Lee DS, Lee HY, Nam KS, Yang SY. Explanatory text of the geological map of Chuncheon sheet 1:50000. Geological and Mineral Institute of Korea 1974
- Lombardi S, Voltattorni N. Rn, He and CO<sub>2</sub> soil gas geochemistry for the study of active and inactive faults. *Appl Geochem* 2010;25:1206-1220
- Mendelejew D. “Über die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente”. *Zeitschrift für Chemie* (in German) 1869;405-406
- Ministry of Environment. Natural radioactive materials within life. Understanding of radon 2016
- Moon KH, Kim JS, Ahn JK, Kim HC, Lee, HM. Long-term Variation of Radon in Granitic Residual Soil at Mt. Guemjeong in Busan. Korea. *J Petrol Soc Korea* 2009;18(4):279-291
- NIER(National Institute of Environmental Research). National survey(2015-2016) of indoor radon at home in Korea. 2016
- Park HC, Choi HS, Cho SY, Kim SH. Numerical Study on Indoor Dispersion of Radon Emitted from Building Materials. *J Kor Soc Environ Eng* 2014;36(5):325~332
- Park KH, Lee BJ, Cho DL, Kim. Geological report of the Hwacheon sheet 1:50000. Korea Institute of Geology Mining and Materials 1997