

## 지구화학환경에서의 라돈농도분포와 라돈농도의 지배요인(사례연구)

전효택(서울대학교 지구환경시스템공학부)

### Radon distribution in geochemical environment and controlling factors in Radon concentration(Case study)

Hyo-Taek Chon

(School of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University)

**요 약** : 기반암별로 구획화된 지역(서울대학교 관악캠퍼스, 경기도 가평, 충북 보은)에서의 사례연구결과, 화강암질 암석의 잔류토양에서 라돈농도가 상대적으로 높은 값을 나타냈다. 이는 기반암에 따른 우라늄의 지구화학적 분포의 차이가 1차적 원인으로 작용했기 때문이라 판단된다. 라돈의 발산율에 영향을 미치는 토양의 함수율과 우라늄-라듐간의 방사능평형도 토양가스 중 라돈농도를 지배하는 2차적 요인임이 실험에 의해 증명되었다. 서울대학교 관악캠퍼스 지역에서 선정한 40개의 실내공간에서 라돈 및 라돈후대핵종농도 분포를 조사한 결과, 지하실에 위치하면서 환기가 불량한 일부 실내공간에서 EPA의 라돈 기준치인 4 pCi/L을 초과하는 농도를 나타냈다. 또한, 실내에서의 라돈농도와 비교한 결과, 일반적으로 양의 상관성을 보여, 토양가스가 실내라돈유입의 주 근원임이 확인되었다. 단층이 위치한 경주 및 가평지역에서 단층선과의 거리에 따른 라돈농도분포를 조사한 결과, 일부 지역에서 단층구조의 영향으로 인해 라돈의 이동성이 증가하여, 해당 토양의 우라늄함량만으로는 설명할 수 없는 높은 라돈이상치가 나타났다.

**주요어** : 기반암, 라돈, 발산율, 단층

**Abstract** : Three study areas of Kwanak campus(Seoul National University), Gapyung and Boeun were selected and classified according to bedrock types in order to investigate soil-gas radon concentrations. Several soil-gas samples showed relatively high radon concentrations in the residual soils which derived from granite bedrock. It also showed that water content of soil and the degree of radioactivity disequilibrium was a secondary factor governing radon emanation and distribution of radon radioactivity. The results of radon concentrations and working levels for forty rooms in Kwanak campus, Seoul National University, showed that indoor basement rooms under poor ventilation condition can be classified as high radon risk zone having more than EPA guideline(4 pCi/L). Some results of section analysis which was surveyed in the fault zone of Kyungju and Gapyung area confirmed the existence of fault-associated radon anomalies with a meaning of radon risk zone.

**Keywords** : Radon distribution, bed rock environment, indoor environment, Radon emanation, fault

## 1. 서론

라돈(Radon)은 우라늄(Uranium)과 토륨(Thorium)방사능계열에서 라듐(Radium)의 방사능붕괴로 생성되는 기체로, 인체에 흡입될 경우 라돈후대핵종인 폴로늄(Polonium)의 알파붕괴에 의해 폐암을 일으킬 수 있는 유해성 물질이다. 라돈에 의한 미국내 사망자수는 연간 7,000~30,000명 정도로 폐암발생을 일으키는 원인 중 흡연에 이어 두번째로 높은 것으로 알려져있다 (EPA, 1992). 라돈에 의한 방사능피폭의 문제가 심각한 것임에도 불구하고 국내에서는 환경위해요소로서의 인지도가 매우 부족하며, 이에 대한 환경적 측면의 연구도 '대전시 지역 라돈 환경 지화학 연구' (홍영국 등, 1997)와 '서울시 지하철역내의 라돈농도 분포 및 저감대책' (김동술 등, 1993) 등에 불과한 실정이다.

저자의 연구실에서는 1997년 이후로 지질환경에서 라돈방사능에 관한 기초연구를 수행하였다. 연구결과를 종합해 보면, 첫째, 서울대학교 관악캠퍼스, 충청북도 보은 및 경기도 가평 지역을 선정하고 해당지역을 다시 기반암별로 구체화하여 실내라돈유입의 주근원이 되는 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 농도를 잔류토양에서 측정하였다(제현국 등, 1998a). 서울대학교 관악캠퍼스 지역의 경우, 실내라돈 농도분포를 조사하여 토양가스 중 라돈농도와의 상관성을 분석하였다(제현국 등, 1998b). 또한 토양에서의 라돈방사능 위험지수 (radon risk index)를 도출하여 지역별, 기반암별 구체에서 라돈방사능의 위험도를 상대적으로 비교하였으며, 세부연구로서 Geiger-Müller counter로 측정된 지표방사능값과 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 농도와의 관련성을 평가하였으며 토양의 함수율 및 입도에 따른 라돈발산의 경향을 실험을 통해 간접적으로 예측하였다(Je *et al.*, 1999). 또한 일부 토양시료의  $^{238}\text{U}$ 계열 원소들의 방사능을 측정하여 방사능 지구화학적 고찰의 중요성을 제안하였다. 두 번째의 연구내용은 단층대에서의 토양가스 중 라돈농도분포의 경향에 대한 조사로, 경기도 가평 지역과 경상북도 경주 지역을 대상으로 하였으며, 단층선 중심부에서 거리에 따른 라돈농도분포조사와 토양의 물성자료를 확보하여 현장에서 측정된 라돈이상값의 원인을 규명하고자 하였다. 또한 경주지역의 경우, EPA의 radon risk index와 confidence level을 도출하여 종합적인 라돈방사능을 평가하였다.

## 2. 이론적고찰

본 연구에서의 대상원소인 라돈은 3.8일의 반감기를 가지는  $^{222}\text{Rn}$ 이다. 자연적 기원의 라돈동위원소에는  $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{219}\text{Rn}$  등이 있으나 이들의 반감기는 1분 이하이기에 그 생성 및 이동특성을 고찰하는데에는 무리가 있다고 판단되어 본 연구에서는 제외시켰다.

라돈의 발산능력(emanating power)은 광물입자에서 생성된 라돈원자의 수에 대한 공극으로 탈출한 라돈원자의 비를 말한다. 라돈발산속도(emanating rate), 라돈생성속도(radon production rate)의 용어도 이와 같은 개념이며 대기발산속도(exhalation rate)도 유사한 개념이다. 토양입자에서 라돈발산율은 일반적으로 0.1~0.4 정도로 알려져 있다(Leslie and Lunau, 1992). 토양층에서의 라돈의 이동은 농도확산에 의한 이동과 압력구배에 의한 이동으로 구분된다. 일반적으로 점토질에서는 농도확산이, 사질에서는 압력구배에 의한 이동이 지배적으로 알려져있다. 토양층에서 생성될수 있는 라돈의 최대농도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{Rn(pCi/L)} = \frac{\text{토양밀도(g/cm}^3\text{)} \times 1,000 \times \text{Ra(pCi/g)} \times \text{발산계수}}{\text{공극률}} \quad (1)$$

또한, 토양층에서 라돈의 확산을 고려할 때, 심도  $z$ 에서의 라돈농도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Rn(z) = Rn(\infty) \times [1 - \exp(-z/L)] \quad (2)$$

$Rn(\infty)$  : 최하부 토양층에서의 라돈농도(최대라돈농도)

$L$  : 라돈의 확산길이(diffusion length);

$$L = \sqrt{\frac{D_{Rn}}{\lambda \times S}}$$

$D_{Rn}$  : 라돈의 확산계수

$\lambda$  : 라돈의 붕괴상수 ( $2.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ )

$S$  : 토양공극률

식(1)과 식(2)를 고려할 때, 해당 토양환경에서 측정된 라돈농도는 라돈의 확산이동만 고려할 때, 식(1)과 식(2)의 합을 초과할 수 없으며, 만약 측정값이 위의 이론적인 계산값을 초과할 경우 이는 압력구배에 의한 이동의 영향으로 판단하는 것이 바람직하다고 사료된다.

토양가스의 채취는 각 기반암의 잔류토양에서 실시하였으며 동일지점에서 Geiger-Müller counter를 이용하여 지표방사능을 cpm (count per minute)단위로 측정하였다.  $^{222}\text{Rn}$ 의 측정에 사용된 검출기는 캐나다 SCINTREX사의 RDA-200이며 방사능 붕괴시 생성된  $\alpha$  입자가 황화아연 (ZnS)으로 내부벽면이 도포된 광전자증폭기 (photomultiplier tube)인 섬광셀 (scintillation cell)에서 측정되는 방식이다 (Durrance, 1986). 토양가스의 채취는 핸드오거를 이용하여 50 cm 정도 토양을 판 후 속이 빈 강철 probe (길이: 40 cm, 외경: 9 mm, 내경: 4 mm)를 이용하여 토양에 삽입한 후 160 ml의 토양가스를 추출하여 실시하였다.  $^{222}\text{Rn}$ 농도의 계산은 Morse의 3분 측정방법 (Morse, 1976)을 이용하였으며, 매 측정마다 측정셀의 방사능 배경값을 측정하였고 표준셀을 이용하여 측정된 라돈농도 (cpm)값을 오차  $\pm 10\%$ 로 보정하였다.

실내공간에서 공기의 포집 및 라돈농도의 측정은 순간측정방식 (grab sampling method)을 이용하였다. 실내공간의 중앙부에 공기펌프를 1미터 높이에 설치하여 공기를 포집하는 방법으로 분당 4 l의 유량으로 20 l 이상의 공기를 포집한 후 측정셀 (cell)을 검출기 (RDA-200)에 넣어 측정하는 방식이다 (SCINTREX, 1994). 공기포집전 측정셀의 배경치 및 counter 효율을 측정하였는데 counter 효율은 값 (cpm; counts per minute)을 알고 있는 표준셀을 이용하여 5분동안의 평균 cpm값을 표준셀의 cpm값으로 나눠서 계산된다 (SCINTREX, 1994). 공기펌프로 공기를 포집한 후 라돈가스가 방사능평형에 도달하기 위해 2-3 시간 정도 경과한 후 검출기에 cell을 넣어 5분간 측정을 하였으며 라돈농도의 계산은 다음과 같다.

$$\text{cpm} = (\text{measured cpm} - \text{background cpm}) \div \text{counter efficiency}$$

$$^{222}\text{Rn}(\text{pCi/L}) = \text{cpm} \div \text{correction Factor} (=2.22 \times 0.28)$$

$$2.22 = \text{factor of } 2.22 \text{ dpm/pCi/L (constant)}$$

$$0.28 = \text{cell efficiency}$$

라돈후대핵종 농도의 측정은 라돈가스의 측정과 동시에 수행하였으며 필터 (0.80 μm)에 포집된 미세입자 중의 라돈후대핵종의 알파방사능을 측정하는 원리이다. 라돈후대핵종 농도의 측정은 Kusnetz 방법 (SCINTREX, 1994)을 사용하였는데 핀셋을 이용하여 홀더캡에서 분리한 후 밀폐용기에 보관하여 40-90분이 경과한 후 필터를 측정용 tray에 넣어 5분간 측정하는 방식이다. <sup>241</sup>Am 알파방사능 디스크를 이용하여 tray 효율을 점검하였으며 라돈후대핵종농도인 워킹레벨 (WL; working level)의 계산은 아래와 같다 (SCINTREX, 1994).

$$\text{cpm} = (\text{measured cpm} - \text{background cpm}) \div \text{counter efficiency}$$

$$\text{WL} = \text{cpm} \div (\text{tray efficiency} \times \text{collected air volume} \times \text{Kusnetz factor})$$

Kusnetz Factor는 후대핵종들의 농도를 반감기에 따른 붕괴정도와 시간차에 의해 추정된 보정상수로 여기서 시간차는 '시료채취가 끝난 시각에서 측정 시작 후 2분30초가 경과했을 때의 시각과의 차'를 말한다 (SCINTREX, 1994).

### 3. 토양가스 라돈농도분포 연구사례

#### 3.1. 연구지역의 지질 및 시료채취

##### 서울대학교 관악캠퍼스

본 연구지역은 행정구역상 서울특별시 관악구 신림동에 위치하는 서울대학교 관악캠퍼스 전역이다. 기반암은 쥐라기 대보화강암으로 암체는 암주상을 이루며 북동 방향으로 향한 타원형에 유사한 분포상을 보인다. 화강암의 절리면들은 주로 일차적 장력 절리로서 남동과 북동의 경사면을 가진 것이 우세하게 나타난다. 주로 흑운모 화강암으로 구성되어 있으며 조암광물은 흑운모, 석영, 장석류 등으로 전형적인 화강암에 해당된다 (김남장과 홍승호, 1975). 1997년 8월 30일에 관악캠퍼스내의 관악산 접경지대인 순환도로변에서 총 10개의 토양가스 및 토양시료를 채취하였다.

##### 충청북도 보은지역

본 연구지역은 위도 36°27'30"~36°32'00", 경도 127°34'00"~127°37'30"에 위치하는 충청북도 보은군 일부이다. 지질은 하부로부터 캄브리아기의 백봉리층군 및 시대미상의 옥천계를 이루는 변성퇴적암류, 고생대초기의 조선계 해성퇴적암류, 고생대후기의 평안계 육성퇴적층과 이를 관입한 쥐라기의 화강암류 및 시대미상의 맥암류로 분류되고 이를 부정합으로 덮는 충적층이 하천을 따라 발달되어 있다 (김옥준 등, 1977). 본 연구지역을 지질도의 내용과 현장관찰을 병행하여 오동리 부근의 셰일과 석회암지대 (SL; Shale, Limestone), 창리층이 위치한 흑색점판암 및 셰일지대 (BS; Black Slate, Shale), 부수봉 부근의 천매암과 편암지대 (PS; Phyllite, Schist)로 구획화 하였으며 1997년 5월5일에 SL지대에서 6개, BS지대에서 12개, PS지대에서 5개씩 총 23개의 토양가스 및 토양시료를 채취하였다.

##### 경기도 가평지역

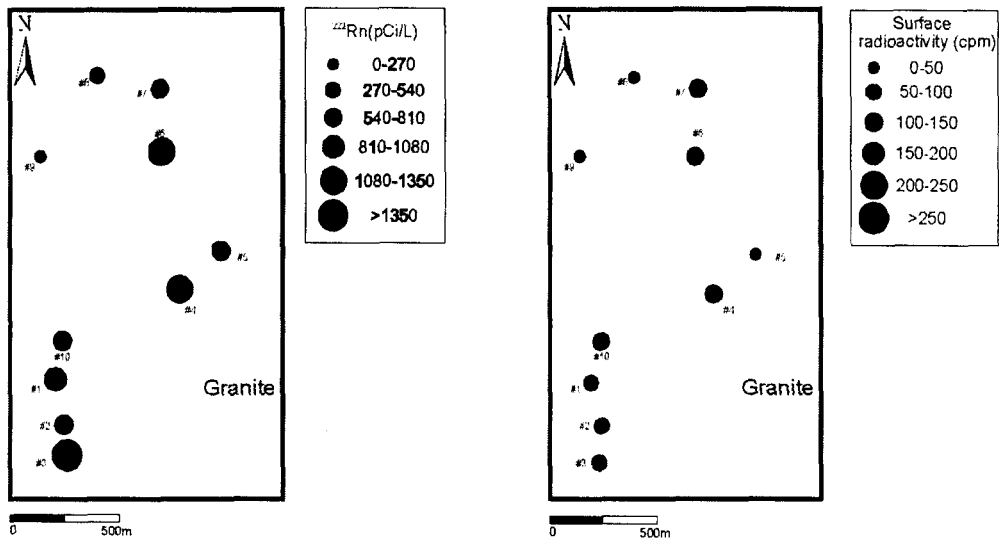
본 연구지역은 위도 37°49'00"~37°51'00", 경도 127°30'30"~127°32'30"에 위치하는 경기도 가평군 가평읍 읍내리 일대와 강원도 춘성군 남산면 서천리 일대이며 이 지역은

1980년도에 동력자원연구소에 의해 보납산 일대의 우라늄광상 탐사 조사가 수행되었던 곳이다. 지질은 선캄브리아시대의 변성암류와 이를 관입한 화성암류로 대별되어 하부로 부터 선캄브리아시대 장락층군의 장락산규암층과 삼산현층, 고기화성암류의 우백질 화강편마암과 이를 부정합으로 덮는 층적층이 강변을 따라 발달되어 있다 (김옥준 등, 1974). 본 연구지역을 지질도의 내용과 현장관찰을 병용하여 보납산 서쪽의 운모편암지대 (MS; Mica Schist), 보납산 동쪽 및 북한강 연변의 호상편마암지대 (BS; Banded Gneiss) 그리고 북한강 동쪽의 강원도 춘성군 남산면 서천리 헛골지역의 화강편마암지대 (GG; Granite Gneiss)로 구획화하였으며 1997년 8월16일에 MS지대에서 5개, BG지대에서 7개, GG지대에서 8개씩 총 20개의 토양가스 및 토양시료를 채취하였다.

### 3.2 결과 및 고찰

#### 토양가스 중 $^{222}\text{Rn}$ 농도 분포

서울대학교 관악캠퍼스지역의 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 농도 및 지표방사능값의 측정결과,  $^{222}\text{Rn}$ 의 농집범위는 110-1,426 pCi/L, 평균농도는 822 pCi/L를 나타냈고 지표방사능값은 30-120 cpm의 범위에 평균 79 cpm을 나타냈으며 10개 시료 중 1개의 시료만이 1,350 pCi/L를 초과하였다 (Table 1). 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 농도와 지표방사능값의 분포를 살펴보면 연구지역의 공간적 제한성에 의해 뚜렷한 경향이 나타나지는 않은 것으로 판단된다 (Fig. 1). 일부 토양가스시료에서 비교적 높은  $^{222}\text{Rn}$ 농도가 측정되었는데 이러한 1차적 원인은 관악캠퍼스지역의 기반암이 화강암이기 때문이라 판단된다. 화강암의 경우 암석의 생성환경상 일반적으로 우라늄의 농도가 높으며, 라돈발산율이 15%, 라돈방사능이 한 시간당  $4 \times 10^{-3}$  pCi/g 정도로 기타 화성암 및 퇴적암에 비해 가장 높은 값을 가진다고 알려져 있으며, 화강암지대의 토양층에서의 방사능은 약 1.6 pCi/g로 토양 방사능배경값의 두 배 정도로 알려져 있다 (Barretto, 1972).



(a) Soil-gas  $^{222}\text{Rn}$  concentration map.

(b) Surface radioactivity map.

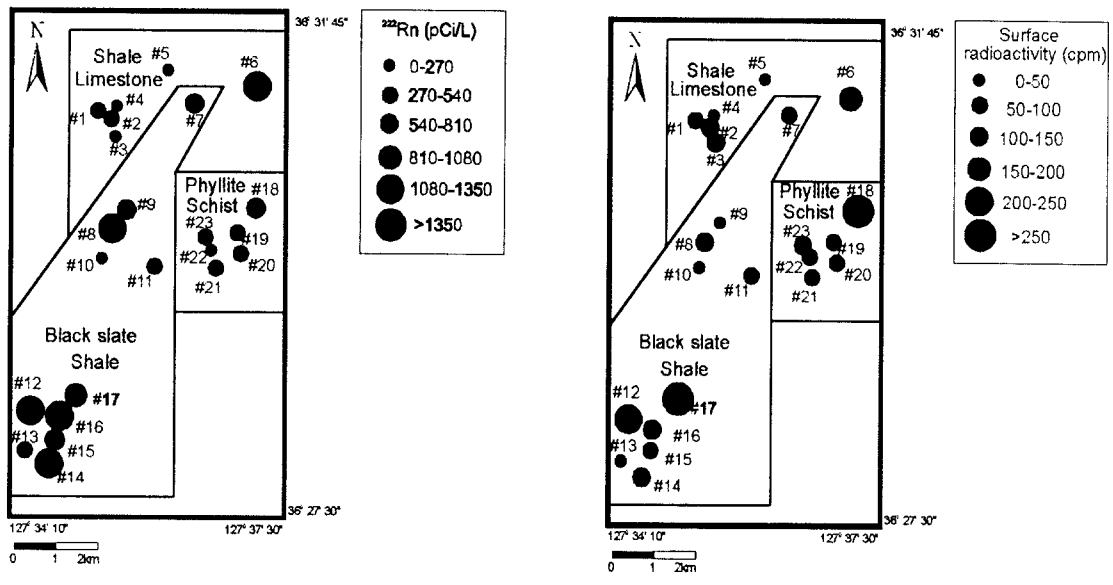
Fig.1 Soil-gas Rn concentration and surface radioactivity map in Kwanak campus.

보은지역의 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 농도 및 지표방사능값의 측정결과, 전체 23개의 토양가스 시료 중  $^{222}\text{Rn}$ 농도가 1,350 pCi/L를 초과한 시료는 없었으며 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 의 농집범위는 180-1,293 pCi/L, 평균농도는 606 pCi/L을 나타냈으며, 지표방사능값은 20-260 cpm의 범위에 평균 98 cpm을 나타냈다 (Table 1). 이를 기반암별로 분류하면, SL지대에서는  $^{222}\text{Rn}$ 의 평균농도가 464 pCi/L이며, BS지대에서는 평균 793 pCi/L, PS지대에서는 평균 328 pCi/L이고, 지표방사능값의 경우 SL지대에서는 평균 83 cpm, BS지대에서는 평균 113 cpm, PS지대에서는 평균 78 cpm으로 BS>SL>PS 순서로 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 농도 및 지표방사능값이 분포되었음을 알 수 있다 (Table 1, Fig. 2). 측정된 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 농도를 토양의 우라늄농도와 비교하기 위해 이진수 (1997)에 의해 연구된 보은지역의 토양 중 우라늄농도를 이용하였는데 토양가스 채취지점과 인용된 자료의 위치가 같은 경우는 그대로 이용하였으나 위치가 다른 경우는 krigging 방법을 통해 값을 환산하여 적용시켰다. 23개의 시료채취 지점에 대한 토양중 우라늄농도는 평균 6.1 mg/kg이며 기반암별로 분류한 경우, SL지대에서는 6.4 mg/kg, BS지대에서는 7.0 mg/kg, PS지대에서는 3.8 mg/kg으로 토양중 우라늄농도도 BS>SL>PS 순서로 분포되어 나타났다 (Table 1). 23개의 시료채취지점에 대한 토양의 우라늄농도와 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 농도와의 관계는 결정계수  $R^2$ 이 0.52로 양의 상관관계 ( $\alpha=0.01$ ) 임이 나타났다. 이는  $^{238}\text{U}$ 에서  $^{226}\text{Ra}$ 으로 이어지는 방사능 계열이 비교적 closed system에 가까운 환경에서 분포한다는 것을 의미하며 또한, SL, BS, PS지대별로 분류하였을 때의 관계를 살펴보면, SL, PS지대의  $^{222}\text{Rn}/\text{U}$  비에 비해 BS지대의  $^{222}\text{Rn}/\text{U}$ 비가 큼을 알 수 있는데 (Fig. 3), 이는 BS지대에서의  $^{226}\text{Ra}$ 의 방사능이 크거나  $^{222}\text{Rn}$ 의 탈산능력이 상대적으로 다른 지대에 비해 높음을 간접적으로 의미한다.

Table 1. The mean value of  $^{222}\text{Rn}$  in soil-gas, surface radioactivity and uranium content of soils from different base rocks in three study areas.

Area(Rock)	No. of samples	$^{222}\text{Rn}$ (pCi/L)	Surface radioactivity (cpm)	Uranium (mg/kg)
Kwanak (Gr)*	10	822	79	no data
Boeun (SL)	23 (6)	606 (464)	98 (83)	6.1 (6.4)
(BS)	(12)	(793)	(113)	(7.0)
(PS)	(5)	(328)	(78)	(3.8)
Gapyung (MS)	20 (5)	1,082 (443)	141 (108)	no data
(BG)	(7)	(1,179)	(139)	
(GG)	(8)	(1,396)	(164)	

가평지역의 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 농도 및 지표방사능값의 측정결과, 20개의 토양가스시료 중  $^{222}\text{Rn}$ 농도가 1,350 pCi/L를 초과한 시료는 4개였으며 BG지대에서 1개, GG지대에서 3개였다. 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 의 농집범위는 255-4,943 pCi/L, 평균농도는 1,082 pCi/L을 나타냈으며



(a) Soil-gas  $^{222}\text{Rn}$  concentration map

(b) Surface radioactivity map

Fig.2 Soil-gas Rn concentration and surface radioactivity map in the Boeun area.

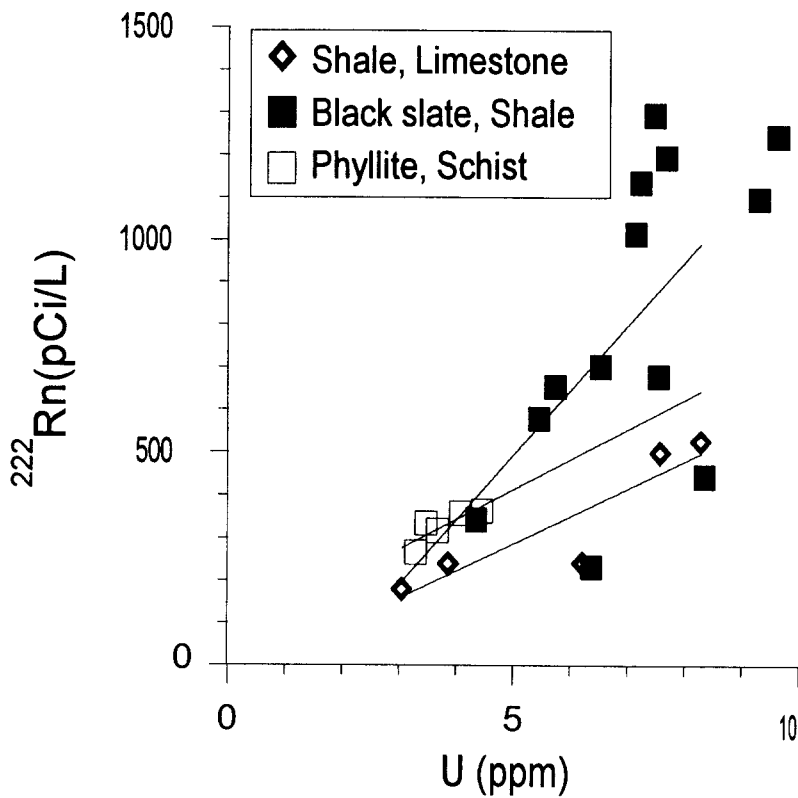


Fig.3 Relationship between soil-gas Rn concentration and U content in soils from Boeun area.

지표방사능값은 70-240 cpm의 범위에 평균 141 cpm을 나타냈다 (Table 1). 이를 기반암별로 분류하면 MS지대에서는  $^{222}\text{Rn}$ 의 평균농도가 443 pCi/L이며, BG지대에서는 1,179 pCi/L, GG지대에서는 1,396 pCi/L이고, 지표방사능값의 경우 MS지대에서는 평균 108 cpm, BG지대에서는 평균 139 cpm, GG지대에서는 평균 164 cpm으로 GG>BG>MS 순서로 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 농도 및 지표방사능값이 분포되었음을 알 수 있다 (Table 1, Fig. 4). 가평지역의 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 농도의 평균값은 1,350 pCi/L를 초과하지 않으나 4개의 토양가스 시료에서 1,350 pCi/L를 초과하여 토양환경에서 잠재적 라돈방사능 위험지역으로 분류될 수 있다고 판단된다. 또한 본 연구지역의 BS지대 및 GG지대에서 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 농도가 평균 1,000 pCi/L 이상을 보였으며 특히 GG지대에서는 8개의 토양가스 시료중 3개의 시료가 1,350 pCi/L 이상을 나타내는 등 평균농도도 1,350 pCi/L 이상을 나타냈다. 이는 편마암 및 화강암에서의 높은 라돈발산율 및 라돈방사능에 기인한 것으로 예상되는데 편마암의 경우 라돈발산율이 15%, 라돈방사능이 한 시간당  $1 \times 10^{-3}$  pCi/g 정도로 화강암 다음으로 높은 것으로 알려져 있다 (Barretto, 1972). 또한 호상편마암지대 및 화강편마암지대의 일부가 변성작용을 받아 암석의 mylonite화가 진행되었기 때문이라 판단되는데 (구성분 등, 1981) mylonite는 250°C 이상에서 ductile shear로 인해 발달한 암석으로, mylonite의 발달에는 일반적으로 미세구조, 공극률, 유체투과율, 화학조성 등의 변화가 발생하여 우라늄의 이동도와 농도에도 변화가 일어난다고 알려져 있으며 광물의 입도감소에 기인하여 함우라늄광물에서 우라늄 방출이 일어나며 또한 암석의 결정 재배열에 의해 oxidizing fluid와 방출된 우라늄과의 작용이 일어나 산화용액에 의한 우라늄의 분포가 변화하여 궁극적으로는 라돈의 발산이 촉진된다고 알려져 있다 (Gundersen and Wanty, 1991).

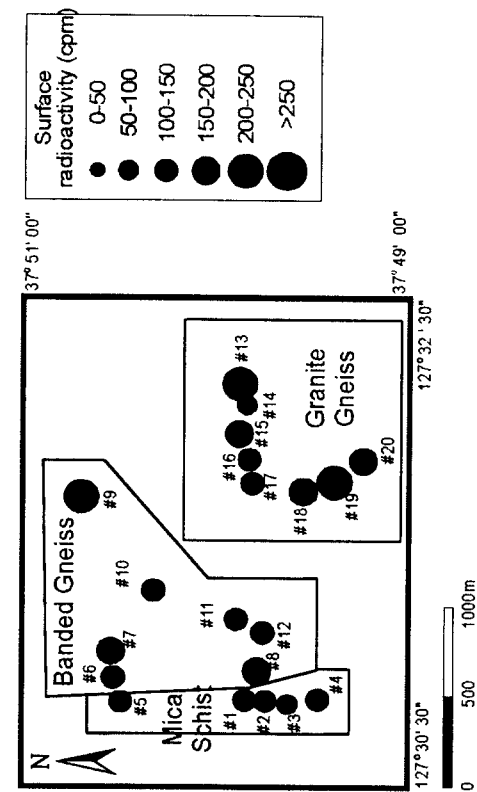
#### 지표방사능값과 토양가스 중 $^{222}\text{Rn}$ 농도와의 비교

서울대학교 관악캠퍼스, 보은, 가평지역의 지표방사능값과 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 농도와의 관계는 각각 결정계수  $R^2$ 이 0.55, 0.37, 0.41로 세 지역 모두 측정요소간의 양의 상관관계 ( $\alpha = 0.01$ )를 나타냈다 (Fig. 5). 라돈이 유일한 가스상 방사능물질이기에 토양가스에서 측정된  $^{222}\text{Rn}$ 농도와 동일지점의 지표대기에서 Geiger-Müller counter로 측정한 값이 본 연구지역에서 통계적으로 유의한 상관관계를 보였다고 판단되나 토양에서 지표대기로 발산되는 라돈의 양이 토양의 물리적 특성에 의해 영향을 받고 또한  $^{222}\text{Rn}$  농도는  $\alpha$  방사능에 의해 측정된 것이기에  $\beta, \gamma$  방사능을 측정하는 반정량적인 Geiger-Müller counter와의 원리상 차이가 존재하므로 지표방사능값은 토양에서 라돈의 이상대를 탐지하기 위한 참고수치로서 의미가 있는 것으로 판단된다.

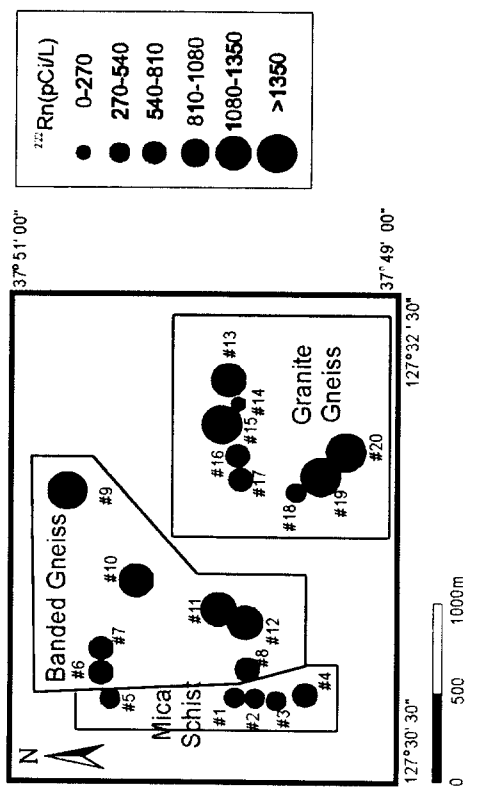
#### 연구지역의 라돈방사능 위험도의 비교

서울대학교 관악캠퍼스, 보은, 가평지역의 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 의 평균농도를 비교한 결과, 가평>관악캠퍼스>보은 순서로 나타났으며, 기반암별로 구획화한 경우 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 의 평균농도를 비교한 결과, GG (화강편마암)>BG (호상편마암)>Gr (화강암)>BS (흑색점판암-세일)>MS (운포편암)>SL (세일-석회암)>PS (천매암-편암) 순서로 나타났다. 지역별로 t-test를 수행한 결과, 보은지역과 가평지역간의 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 농도의 평균값만 유의한 차이를 나타냈을 뿐 ( $P < 0.01$ ) 관악캠퍼스지역과 가평지역, 보은지역과 가평지역간에는 유의한 차이를 나타내지 못했다 ( $P > 0.01$ ). 보은지역을 기반암별로 구획화한 경우 SL지대와 BS지대간의 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 농도의 평균값은 유의한 차이를 나타냈으나 ( $P < 0.01$ ) 다른 경우





(a) Soil-gas <sup>222</sup>Rn concentration map



(b) Surface radioactivity map

Fig.4 Soil-gas Rn concentration and surface radioactivity map in the Gapyung area.

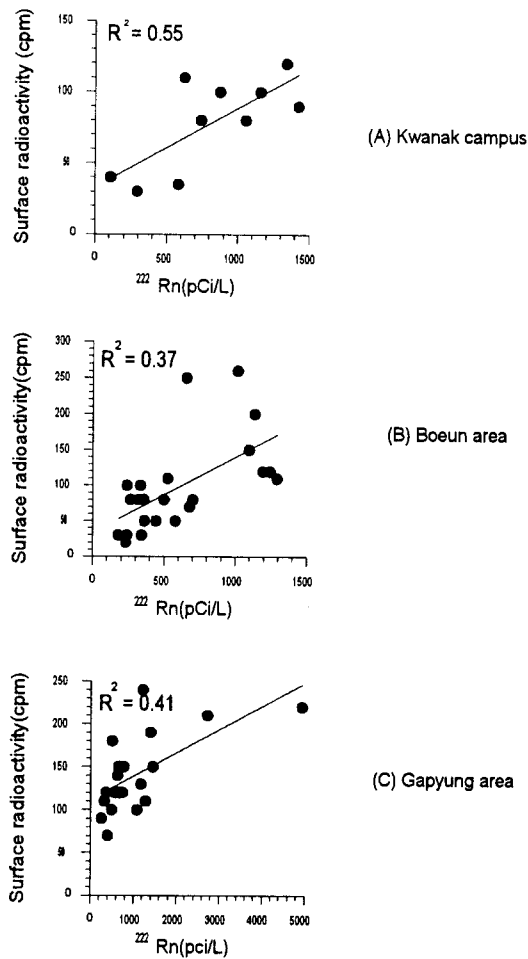


Fig.5 Relationship between surface radioactivity and Rn concentration in study areas.

에는 유의한 차이를 나타내지 않았다 ( $P > 0.01$ ). 가평지역을 기반암별로 구획화한 경우 MS지대와 BG지대, MS지대와 GG지대간의 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 농도의 평균값은 유의한 차이를 나타냈으나 ( $P < 0.01$ ) BG지대와 GG지대간의 평균농도의 유의한 차이는 나타나지 않았다 ( $P > 0.01$ ). 토양가스에 존재하는  $^{222}\text{Rn}$ 은  $^{238}\text{U}$ 방사능 계열이어서 기반암과 잔류토양에 따른 우라늄분포의 지구화학적 차이가 존재하여 기반암별  $^{222}\text{Rn}$ 농집의 차이가 발생할 수는 있으나 우라늄의 지구화학적 분포는 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 의 분포형성에 1차적 요인의 역할만 할 뿐 토양함수율, 토양구조,  $^{226}\text{Ra}$ 의 분포 등과 같은 복합적 2차적 요인에 의해서도  $^{222}\text{Rn}$ 농도가 영향을 받는 것으로 판단된다. 동일 지역이나 동일 기반암 구획에서 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 농집의 범위가 매우 크고, 위의 통계적 기법으로는 토양가스 중 라돈방사능의 위험성을 지역별, 기반암별로 상호 비교하는데에 어려움이 있다고 판단되어 라돈방사능 위험지수 (radon risk index)를 도출하여 이를 비교하였다. 라돈방사능 위험지수는 Wilson (1987)이 제시한 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 농도의 환경기준치가 1,350 pCi/L라는 점에 착안하여 이 값을 6등분하여 각각의 해당범위에 1부터 6까지의 점수를 부여한 후 측정된 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$ 농도를 점수화하여 한 지역 (구획)에서 측정된 시료수 만큼 점수를 합산한 후 계산될 수 있는 최대값으로 나누

것으로 정의되며 계산된 라돈방사능 위험지수는 지역별 또는 구획별로 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$  농도에 따른 라돈방사능의 위험정도를 다른 지역 또는 구획과 상대적으로 비교하는데 있어 용이하다고 판단된다. 라돈방사능 위험지수를 도출한 결과, 지역별로는 가평지역 (0.61), 관악캠퍼스지역 (0.60), 보은지역 (0.45) 순서로 토양에서 라돈방사능의 잠재적 위험성이 높은 것으로 나타났으며, 기반암별로 구획화한 경우에는 호상편마암지대 (0.71), 화강편마암지대 (0.67), 화강암지대 (0.60), 흑색점판암-세일지대 (0.57), 운모편암지대 (0.37), 세일-석회암지대 (0.33), 천매암-편암지대 (0.30) 순서로 토양에서 라돈방사능의 잠재적 위험성이 높은 것으로 판단되었다 (Table 2). 이 결과로부터 퇴적암지대 보다는 화강암으로 대표되는 화성암지대에서 토양가스 중 높은  $^{222}\text{Rn}$  농도와 화성암이 변성작용을 받았을 경우 매우 높은  $^{222}\text{Rn}$  농도를 예상할 수 있다고 판단된다. 그러나 본 연구지역 중 하나인 편암류의 변성암지대의 경우 토양층의 발달이 미약하여 적은  $^{222}\text{Rn}$  농도가 측정된 것으로 예상된다.

Table 2. Radon risk index in soil derived from different base rocks in three study areas.

Score Area(Rock)	1	2	3	4	5	6	Sum (max.)	Radon risk index(sum/max.)
Kwank (Gr)*	1	1	3	2	2	1	36 (60)	0.60
Boeun (SL)	5	8	4	1	5	0	62 (138)	0.45
(BS)	3	2	0	0	1	0	12 (36)	0.33
(PS)	1	2	4	1	4	0	41 (72)	0.57
	1	4	0	0	0	0	9 (30)	0.30
Gapyung (MS)	1	5	6	0	4	4	73 (120)	0.61
(BG)	0	4	1	0	0	0	11 (30)	0.37
(GG)	0	0	3	0	3	1	30 (42)	0.71
	1	1	2	0	1	3	32 (48)	0.67

#### 토양함수율 및 입도에 따른 라돈발산의 경향

본 실험에서의 라돈농도 측정방법은 현장 토양가스 중  $^{222}\text{Rn}$  측정방법인 Morse의 3분 측정방법 (Morse, 1976)과 유사하나 측정된 라돈농도의 단위는 1분간 측정한 cpm으로, 이는  $^{222}\text{Rn}$ 의 농도뿐만 아니라  $^{220}\text{Rn}$  농도도 포함된 값이다. 라돈농도의 가변성으로 인한 1회 측정의 오차를 줄이기 위해 4회씩 측정한 평균값을 이용하였으며 토양가스 채취와 동일하게 Morse의 3분 측정방법 (Morse, 1976)을 하지 않은 것은 시간적 제약성이 있기 때문이다. 본 실험의 결과, 관악캠퍼스지역 토양의 경우 2 mm 이상의 입도와 0.84-2 mm 입도의 경우 10.3 wt.%의 함수율에서 최대 라돈농도를 보였으며 0.84 mm 미만의 입도의 경우 6.4 wt.%의 함수율에서 최대 라돈농도가 나타났다. 보은지역 토양의 경우 2 mm 이상의 입도와 0.84-2mm 입도의 경우 11.8 wt.%의 함수율에서 최대 Rn 농도를 보였으며 0.84mm 미만의 입도의 경우 16.5 wt.%의 함수율에서 최대 라돈농도가 나타났다. 가평지역 토양의 경우 2 mm 이상의 입도와 0.84-2 mm 입도의 경우 16.1 wt.%의 함수율에서 최대 라돈농도가 나타났으며, 0.84 mm 미만의 입도의 경우 14.6 wt.%의 함수율에서 최대 라돈농도가 나타났다.

또한 토양의 입도가 >2.00 mm → 0.84-2.00 mm → <0.84 mm로 작아질수록 동일한 토양 함수율에서 측정된 라돈농도가 커지는 경향이 나타났는데, 이는 입도감소에 의한 토양입도의 비표면적 증가에 의해 궁극적으로 라돈발산이 용이해졌기 때문이라 판단된다. 관악캠퍼스, 보은, 가평지역의 토양함수율과 라돈농도와의 관계를 살펴보면, 토양에서 라돈농도는 토양함수율의 증가에 따라 같이 증가하는 경향을 보이다가 일정 함수율이상에서는 함수율의 증가에 반비례하게 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다. 본 실험에서는 전체적으로 6-16 wt.%의 함수율 구간까지는 라돈농도가 증가하다가 그 이후로는 감소하는 경향을 나타냈다 (Fig. 6). Lindmark (1985)에 의하면 토양에서 라돈의 발산은 토양의 함수율이 15-17 wt.%에 이를 때까지 함수율에 비례하여 증가하며 그 이상의 경우는 감소한다고 하였으며 토양함수율이 약 30%에 이를 때까지 비례하여 라돈농도가 증가한다고도 알려져있다 (BPA, 1989). 본 실험에서도 유사한 경향을 보였는데 이런 현상은 토양입자를 둘러싸고 있는 물 (공극수)이 라돈의 recoil에 의한 정역학적 에너지를 흡수하여, 라돈원자가 인접해 있는 토양입자에 다시 되문혀 활동성을 잃게 되는 현상을 방지하고 공극수에 있는 라돈원자가 액상확산을 통해 궁극으로 이동을 도와 궁극적으로 암석이나 광물, 토양입자에서의 라돈의 발산을 도와주기 때문이라 판단된다. 그러나 일정량 이상의 함수율을 가진 경우에는 공극수로 인해 두꺼

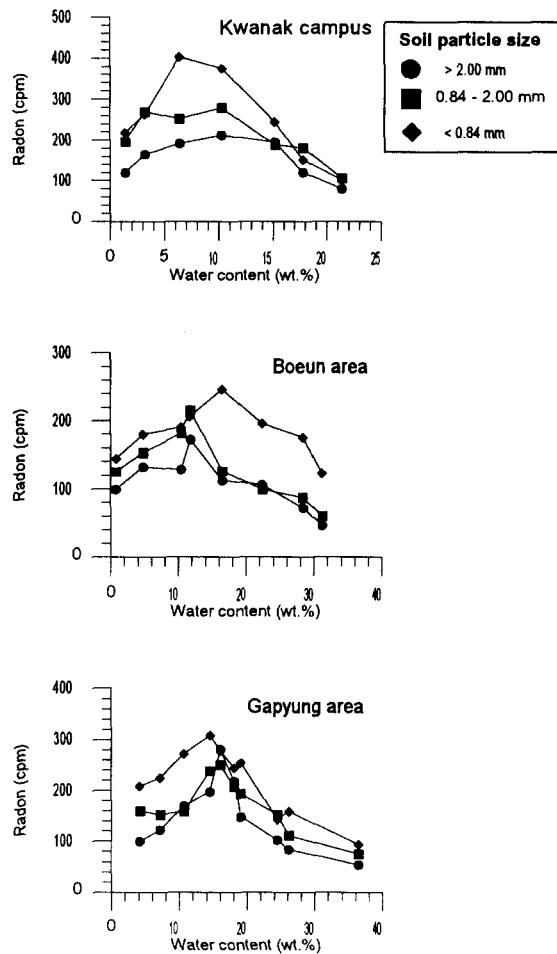


Fig.6 Relationship between water content and Rn radioactivity with grain size for soil samples in study area.

운 막 (film)이 형성되어 라돈원자의 확산길이 (diffusion length)를 감소시켜 라돈의 발산속도는 다시 감소하는 것으로 설명 될 수 있다 (Damkjaer, 1985).

### 방사능지구화학적 고찰

방사능분석의 결과는 Table 3과 같다. 측정된 7개 토양시료의  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 의 비는 0.92-1.02의 범위를 보여  $^{238}\text{U}$ 과  $^{234}\text{U}$ 간의 방사능 비평형은 전반적으로 크게 일어나지 않은 것으로 판단된다. 일반적으로 토양에서  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 의 비는 1이하로 알려져 있는데 (Titayeva, 1994) 관악 캠퍼스지역의 2개 시료, 보은지역의 2개 시료, 가평지역의 1개 시료에서 1이하의 값을 보여 대체로 일치하는 경향을 보였다 (Fig. 7).  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 의 비의 경우, 0.63-1.08의 범위를 보였으며, 전반적으로 1에 가까운  $^{238}\text{U}$  부화현상이 나타났다. 토양에서는 일반적으로 우라늄이 라듐에 비해 선택적으로 용탈되고 우라늄보다 라듐이 철(Fe), 망간(Mn)산화물과 유기물, 점토광물에 흡착이 잘 되기에 라듐이 상대적으로 부화된다고 알려졌으나 (Ivanovich and Harmon, 1992), 본 측정결과에서는 4번 시료를 제외하곤 전부 라듐이 결핍되어 있는 결과가 나타났다.  $^{226}\text{Ra}$ 의 모핵종인  $^{230}\text{Th}$ 이  $^{234}\text{U}$ 에 비해 결핍되었다고 예측할 수는 있으나 토양에서  $^{234}\text{U}$ 이 용탈되기 쉬운점과 토륨이 지구화학적으로 물에 잘 용해되지 않은 특성을 고려할 때 희박한 것으로 판단된다. 그러나,  $^{238}\text{U}$ - $^{226}\text{Ra}$ 간의 방사능 비평형은 전적으로 우라늄을 함유한 광물의 안정성과 연관되어 있다는 관점에서 보면, 토양에서 우라늄이 쉽게 풍화되는 광물에 위치하지 않고 풍화에 대해 저항력이 큰 광물에 위치하고 있다면 방사능붕괴에 의해 생성된  $^{226}\text{Ra}$ 만이 광물의 radiation-damaged zone에서 용탈될 수 있다고 판단된다. 또한 우라늄이 바나듐(V) 또는 인산염에 의해 고정된 경우  $^{226}\text{Ra}$ 은 상대적으로 쉽게 용탈되어  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 의 비가 1보다 작은 값을 보일 수 있다고 판단되며, 라듐의 존재형태가  $\text{RaCl}_2$ ,  $\text{RaBr}_2$ ,  $\text{Ra}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{RaS}$ 와 같이 물에 잘 용해되는 형태일 때는 우라늄에 비해 상대적으로 라듐이 결핍될 수 있

Table 3. Radioactivity of  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{U}$  and  $^{234}\text{U}$  in soil samples from three study areas.(unit in pCi/g)

Sample	Area	$^{210}\text{Pb}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{238}\text{U}$	$^{234}\text{U}$
1	Kwanak	5.18	1.60	0.23	nd*	nd
2	Kwanak	3.32	3.01	nd	3.18	3.18
3	Kwanak	2.97	2.29	nd	nd	nd
4	Kwanak	6.30	2.59	0.86	2.41	2.24
5	Boeun	2.14	1.42	0.12	1.52	1.45
6	Boeun	1.56	0.99	0.21	1.27	1.24
7	Gapyung	2.93	1.33	0.33	1.50	1.56
8	Gapyung	2.66	1.95	nd	nd	nd
9	Gapyung	4.50	1.20	1.13	1.34	1.23
10	Gapyung	3.51	2.72	0.24	4.29	4.38

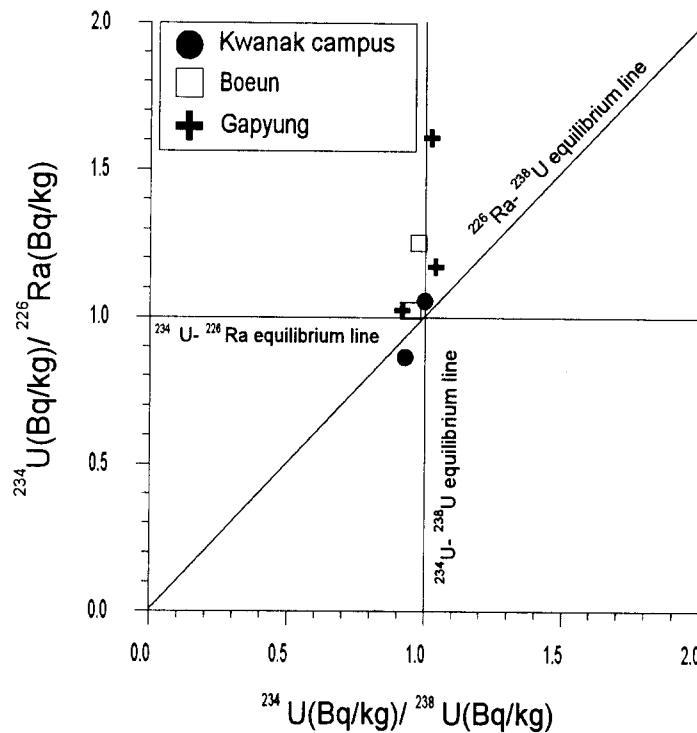


Fig.7 Radioactivity disequilibrium state in soils in study areas.

는 것으로도 알려져 있다 (Ivanovich and Harmon, 1992). 연구지역에서  $^{226}\text{Ra}$ 과  $^{222}\text{Rn}$ 의 관계를 살펴보면, 지역별로는 두 방사능원소간에 비례관계를 보여 일반적인 경향성은 나타나나 통계적으로는 유의하지 못한 수준이다 (Fig. 8). 이는 이미 언급된  $^{222}\text{Rn}$ 의 발산능력 및 토양의 함수율이라는 요인에 의해 공극속의  $^{222}\text{Rn}$ 농도가 영향을 받기 때문이라 판단된다. 그러나 토양의  $^{226}\text{Ra}$ 방사능이 4번 시료를 제외하고는 모든 시료에서 토양에서  $^{226}\text{Ra}$ 의 배경값보다 큰 1 pCi/g 이상을 보여 이들 시료의 채취지점에서 측정된 높은  $^{222}\text{Rn}$ 농도와는 방사능지구화학적 수반관계를 갖는다고 판단된다. 이상과 같이 토양에서  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ 의 지구화학적 특성차이에 의해 방사능평형이 교란을 받아 우라늄과 라듐간의 분포차이가 발생할 수 있으므로 보다 광범위한 방사능원소의 분석을 통해  $^{238}\text{U}$ - $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ - $^{222}\text{Rn}$ 간의 관계를 체계적으로 규명할 필요가 있다고 생각된다.

#### 4. 토양-실내 라돈농도분포 사례연구

##### 4.1 시료채취 및 분석

관악캠퍼스 지역을 기존에 측정된 토양가스의 지점과 건물의 공간적 위치와 특성을 고려하여 8개의 블록으로 구분하였다 (Fig. 9). 각 블록마다 5개의 실내공간을 임의로 선정하여 총 40개의 실내공간을 대상으로 하였는데, 실내공간에서 측정된 라돈농도 및 라돈후대핵종농도는 2-3회 측정한 값의 평균값으로 대표하였다. 라돈농도의 일변화 및 시변화를 고려하여, 실내측정은 1997년 9월 27일-10월 27일 기간동안에 오후 3시-6시로 제한하였다. 토양가스농도와 실내농도와의 관계를 살펴보기 위해, 각 블록마다 하나의 지점을 선정하여 토양

가스 내 라돈농도를 측정하였는데 10월 14일과 10월 27일에 각각 실시하였다.

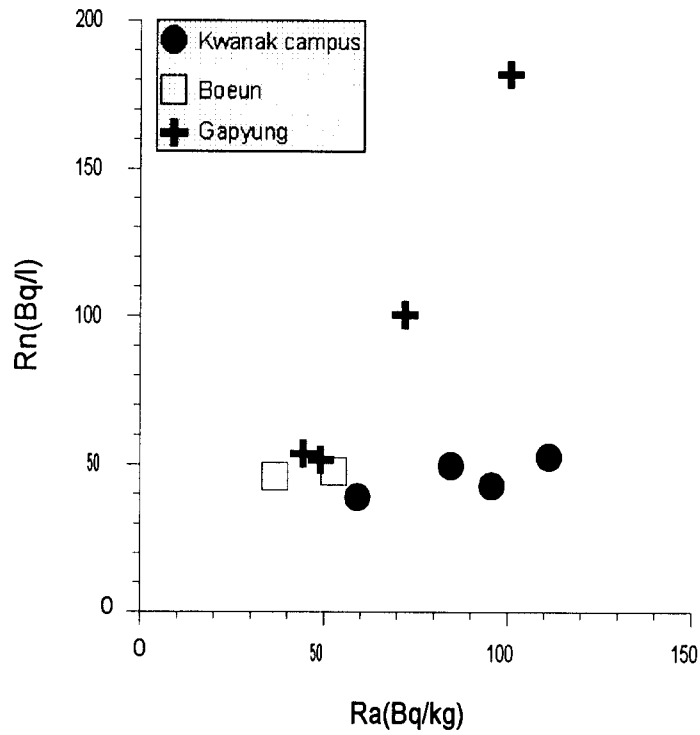


Fig.8 Relationship between Ra and Rn in study areas.

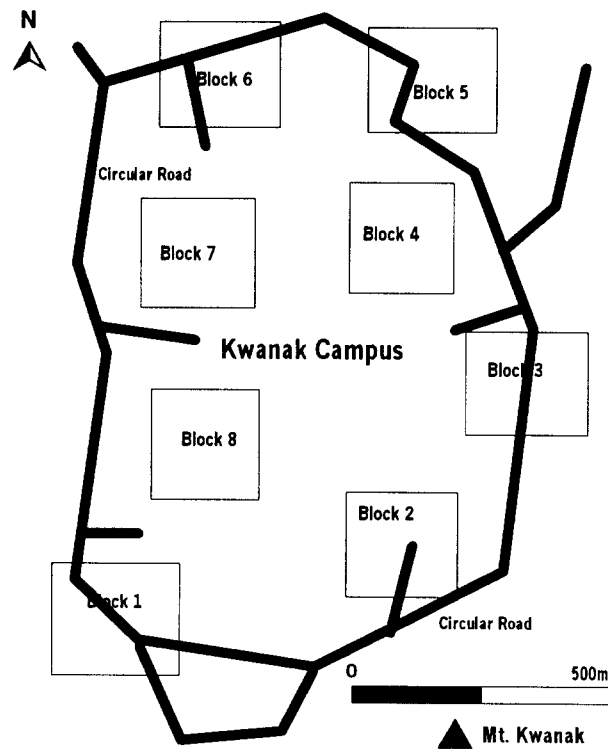


Fig.9 Sampling map showing 8 sampling blocks in Kwanak campus.

## 4.2 결과 및 고찰

### 실내측정결과

관악캠퍼스 실내공간에 대한 측정결과, 라돈농도는 0.8-4.7 pCi/L의 범위에 평균 3.0 pCi/L이며, 후대핵종농도는 0.002-0.027 WL의 범위에 평균 0.011 WL을 나타냈다. 라돈과 후대핵종간의 방사능 평형도를 나타내는 평형상수 (F; equilibrium factor)값의 계산 결과, 0.08-0.82의 범위를 보였으며 평균 35%를 나타냈다.

전체 40개의 시료 중 EPA 실내환경기준치인 4 pCi/L이상을 보인 곳은 9개 (23%)이며, 후대핵종 기준치인 0.02 WL 이상을 보인 곳은 6개 (15%)이며, 두 값 모두 EPA 실내환경기준치 이상인 경우는 5개 였다 (13%). 40개 실내공간에 대한 측정결과로 볼 때, 관악캠퍼스 내 다른 실내공간에서도 비교적 높은 라돈농도가 예상되므로 추후 대상범위를 확대하여 정밀조사가 필요하다고 판단된다.

실내공간의 환기상태와 건물 내 위치에 따른 라돈 및 후대핵종의 분포양상을 종합적으로 파악하기 위해 실내공간이 지하에 위치하면서 환기가 양호한 곳을 집단A1 (7개)로, 1층 이상에 위치하면서 환기가 양호한 곳을 집단A2 (18개)로, 지하에 위치하면서 환기가 불량한 곳을 집단B1 (9개)로, 1층 이상에 위치하면서 환기가 불량한 곳을 집단B2 (6개)로 분류하였다. 분류된 집단의 라돈농도와 후대핵종농도, 그리고 평형상수의 평균값은 Table 4와 같다. 실내공간이 지하에 위치한 경우 환기상태에 따라 (집단A1, 집단B1) 평형상수의 평균은 t-test 결과 유의한 차이가 나타났으며 ( $P < 0.05$ ) 1층 이상에 위치한 경우는 환기상태에 따라 (집단A2, 집단B2) 평형상수의 평균값에서 유의한 차이가 나타나지 않았다 ( $P > 0.05$ ). 또한 환기상태가 양호한 경우 실내공간의 건물내 위치에 따라 (집단A1, 집단A2) 라돈농도와 후대핵종농도의 평균값이 각각 유의한 차이를 보이지 않았으며 ( $P > 0.05$ ), 환기상태가 불량한 경우 실내공간의 건물내 위치에 따라 (집단B1, 집단B2) 라돈농도와 후대핵종농도의 평균값도 각각 유의한 차이를 보이지 않았다 ( $P > 0.05$ ).

Table 4. The mean values of indoor  $^{222}\text{Rn}$  radioactivity, working level(WL) and equilibrium factor(F) among group A1, group A2, group B1 and group B2 in Seoul National University Kwanak campus.

Group	No.	$^{222}\text{Rn}(\text{pCi/L})$	WL	F
A1 (basement+ventilation :O )	7	3.1	0.011	0.30
A2 (1st floor+ventilation ;O)	18	2.5	0.006	0.26
B1 (basement+ventilation :X)	9	4.0	0.021	0.52
B2 (1st floor+ventilation :X)	6	2.7	0.011	0.41



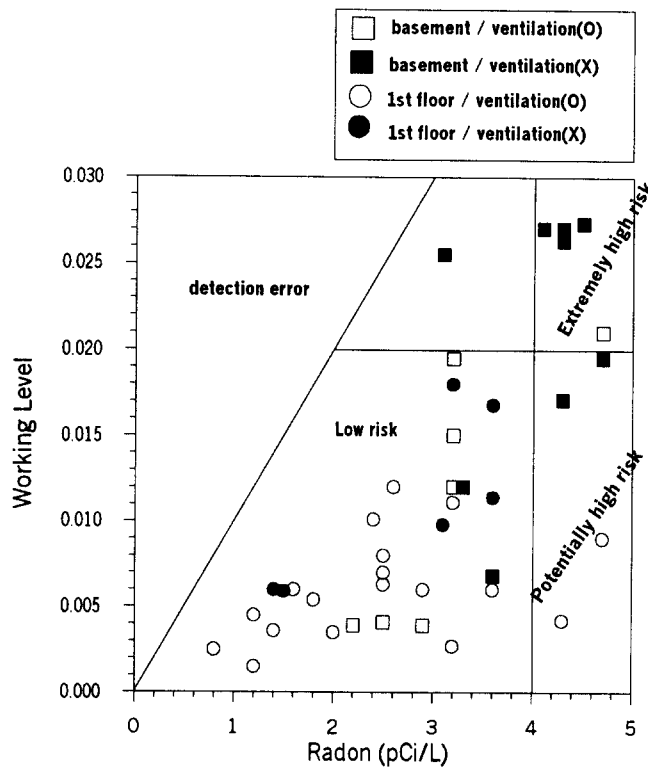


Fig.10 Diagram showing the indoor radon level and working level in Kwanak campus.

각 집단의 해당되는 실내공간을 워킹레벨과 라돈농도에 따라 Fig. 10에 도시하여 나타냈다. EPA 실내기준인 4 pCi/L의 라돈농도와 0.02의 워킹레벨에 근거를 두어 실내공간의 라돈방사능 위험도를 1) Extremely high risk, 2) High risk, 3) Potentially high risk 그리고 4) Low risk로 구분하였다. 인체에 전달되는 알파방사선량은 라돈농도보다 후대핵종농도인 워킹레벨을 의미하는 것이므로, 워킹레벨만 0.02를 초과하는 곳을 'High risk' 공간으로 선정하였으며, 라돈농도만이 4 pCi/L를 넘는 경우를 'Potentially high risk' 공간으로 분류하였다. 분류결과, B1 (지하에 위치하면서 환기가 불량한 공간)집단의 실내공간들은 대부분 라돈방사능의 위험도가 높은 것으로 나타났으며, A2 (1층이상에 위치하면서 환기가 양호한 공간) 집단의 실내공간들은 대부분 라돈방사능의 위험도가 적은 것으로 판명되었다. 그러므로, 관악캠퍼스 실내공간 측정결과를 종합하여 고찰해 볼 때, 실내에서 라돈방사능문제 현상은 높은 라돈농도와 높은 평형상수값으로 요약될 수 있으며, 1층 이상에 위치하면서 환기상태가 양호한 공간이 라돈방사능의 위험도가 적고, 지하에 위치하면서 환기상태가 불량한 공간이 라돈방사능의 위험도가 가장 높은 것으로 판명되었다.

#### 토양가스 라돈-실내라돈

각 8개 블록의 평균 실내라돈농도를 시기별로 4번 측정된 토양가스 내 라돈농도와 비교한 결과, 기존에 측정된 2월 14일과 8월 30일의 토양가스 내 라돈농도와는 각각 상관계수 0.156, 0.165로 약한 양의 관계를 나타내었다 (Fig. 11). 10월 12일에 측정된 토양가스 라돈농도와 상관분석 결과, 두 농도간의 상관계수가 0.59로 양의 상관성을 나타내나 통계적으로는 유의하지 못한 수준으로 ( $P > 0.05$ ) 10월 27일에 측정된 토양가스 라돈농도와 상관분석

결과, 상관계수는 0.78이며, 통계적으로도 유의할 만한 수준 ( $P < 0.05$ )이어서 두 농도간의 강한 양의 상관관계를 나타내었다 (Fig. 11).

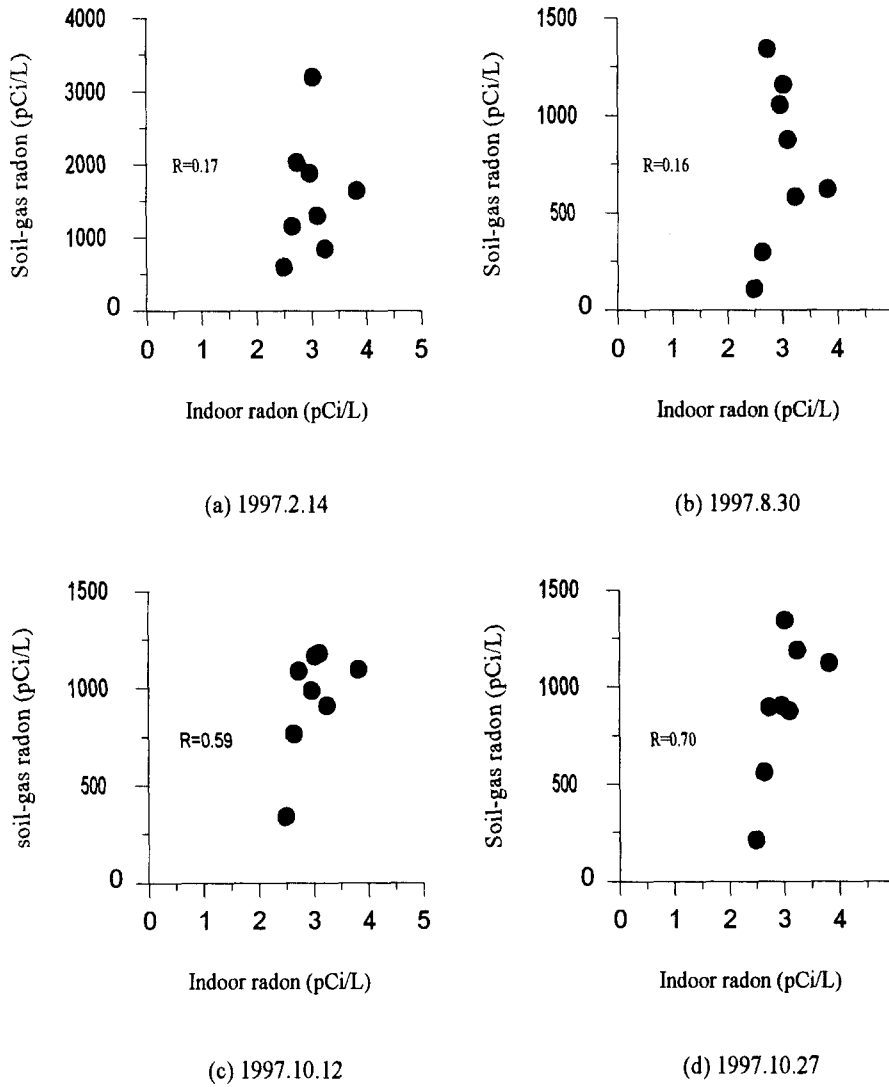


Fig.11 Relationship between soil-gas radon and indoor radon for four different measuring times of soil-gas.

실내 라돈과 토양가스 라돈의 측정시기가 다른 경우, 두 요소간에는 약한 양의 상관관계가 나타났는데, 이는 토양환경에서 라돈농도의 계절적 변화양상에 의한 것으로 판단된다. 4번 측정된 토양가스 내 라돈농도를 각 채취지점마다 비교한 결과도 최대값과 최소값의 비가 1.5-5.4의 범위를 보여 라돈농도의 계절적 변화양상을 잘 반영하고 있다. 그러므로 두 요소의 측정시기는 동일하거나 온도, 습도와 같은 기상조건이 비슷해야 한다. 측정시기가 같은 경우, 두 요소간의 양의 상관관계가 나타났는데 상관계수의 의미는 토양가스의 라돈농도 측정치로부터 실내라돈의 농집도를 예측할 수 있는 수치라고 판단된다. 토양층과 건물사이의 대기 압력차, 건물기초구조의 특성, 토양의 유체투과율 그리고, 실내공간의 특성과 같은 요인에 의해 토양가스 라돈농도와 실내 라돈농도와의 선형관계는 제한을 받는다고 판단된다.

그러나 양의 상관관계를 보이는 것은 토양가스가 실내라돈의 주 근원임을 입증하고 있다.

## 5. 단층지대에서의 라돈농도분포 연구

### 5.1 연구지역 및 시료채취

#### 가평지역: 화악리(HA)

가평지역의 북부에 위치하고 있으며 강경단층이 존재하고 있다. 단층면은 그 각도가 매우 크며, 파쇄대가 발달하고 있으며 일부 습곡대가 발달하고 있다. 또한 단층선의 파쇄대에는 하천이 흐르고 있으며 이 지역의 기반암은 단층선을 중심으로 좌측은 흑운모화강암, 우측은 우백질편마암. 단층선을 중심으로 좌우 방향으로 총 11개의 지점에서 시료를 채취 분석하였으며 토양은 주로 산토양이었다.

#### 가평지역: 햇골(HG)

가평지역의 남부에 위치하고 있으며 화강암층과 규암층이 접하고 있는 지역에서 연구를 실시하였다. 접촉대를 중심으로 좌측은 화강암기반, 우측은 규암기반이며 각각 4개의 지점에서 접촉부의 중심에서부터 시료를 채취, 분석하였다. 토양은 주로 산토양이었다.

#### 경주지역: 우중골(WJ)

경주지역의 북서부에 위치하고 있으며 자인단층이 존재하고 있다. 대략 N10°~20°E 방향의 구조선이 발달되어 있다. 이 지역의 기반암은 안산암으로 백악기의 신라통에 해당된다 (김남장과 진명식, 1971). 총 12개의 시료를 채취하였으며 토양은 주로 산토양이었다

#### 경주지역: 백운암(BW)

경주지역의 동부에 위치하고 있으며 기반암은 백악기시대의 불국사화강암으로 주로 흑운모 화강암이다. 총 6지점에서 시료를 채취하였으며 토양은 주로 산토양이었다.

#### 경주지역: 울동(YD)

경주지역의 북동부에 위치하고 있으며 기반암은 언양화강암이다. 총 6지점에서 시료를 채취하였으며 토양은 주로 산토양이었다.

#### 경주지역: 모량리(MY)

경주지역의 북부에 위치하고 있으며 모량단층이 발달되어 있다. 이 단층은 단층선을 따라 shear zone이 발달되어 있고 본 단층의 동편의 주향은 산정상에서는 NE방향이나 단층선에 가까워지면서 NW로 변하고 경사 역시 산정상에서는 SE이나 단층선 가까이에서는 SW로 변한다 (김남장과 진명식, 1971). 기반암은 흑색 셰일, 녹회색 셰일 등 대구층에 해당되는 변성퇴적암류였으며, 총 9개의 point에서 시료를 채취하였는데 이 중 6 지점은 모량단층의 동부에서 단층선 중심에서 거리에 따라 실시하였다. 토양은 주로 산토양이었다.

#### 경주지역: 월산리(WS)

경주지역의 동중부에 위치하고 있으며 경주지역의 대표적 단층인 언양단층이 발달되어

있다. 본 단층의 동부에서는 주향이 N20°~60°E, 경사가 5°~30° SW이다 (김남장과 진명식, 1971). 기반암은 셰일 및 사암이 변질된 변성퇴적암류로 모량리지역과 동일한 대구층에 해당된다. 언양단층의 서쪽편에서 총 6개 지점에서 단층선을 중심으로 거리에 따라 시료를 채취하였으며, 토양은 산토양이었다.

#### 경주지역: 활천리(HC)

월산리(WS)의 바로 아래쪽에 위치하고 있으며 동일한 지질기반을 가진다. 총 6개의 지점에서 단층선을 중심으로 거리에 따라 시료를 채취하였으며, 토양은 주로 산토양이었다.

### 5.2 결과 및 고찰

경주지역의 5개 subarea의 라돈 및 우라늄의 측정치는 Table 5와 같다. 5개의 subarea 중 단층선과 비교적 가까이 위치하여 단층의 영향력이 있을 것이라 예상되는 3개 지역에 대해 단층선 중심부에서 거리에 따른 section analysis를 수행하였다.

Table 5. Mean values of soil-gas  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{238}\text{U}$  in soil from Gapyung and Kyungju area.

Area	Subarea	$^{222}\text{Rn}$ (pCi/L)	$^{238}\text{U}$ (mg/kg)	Bedrock	Note
Gapyung	HG	712	4.4	Granite/Quartzite	
	HA	327	2.8	Gneiss	Fault zone
Kyungju	BW	443	3.2	Granite	
	YD	939	3.4	Granite	
	WJ	651	1.4	Andesite	Fault zone
	MY	487	1.6	Metasediments	Fault zone
	WS	412	1.7	Metasediments	Fault zone
	HC	1,053	2.1	Metasediments	Fault zone

#### 모량리(MY)

라돈 및 우라늄함량의 분포는 각각 177~1,619 pCi/L, 0.9~1.9 mg/kg을 나타냈다. 라돈의 함량은 단층선에 가까워질수록 증가하는 추세를 보였으며, 특히 단층선에 가장 가까운 지점(100m)에서 라돈의 이상값이 측정되었다 (Fig.12). 토양의 우라늄함량은 특별한 경향성을 보이지 않고 있으며, 이를 통해 이 지역의 라돈분포는 토양의 우라늄함량에 의존하기보다는 단층과 연관된 작용에 의존한다고 판단된다.

#### 활천리(HC)

라돈 및 우라늄함량의 분포는 각각 472~2,536 pCi/L, 1.3~2.6 mg/kg을 나타냈다. 라돈의 함량은 단층선과의 거리에 따라 불규칙한 변화를 보였으며 (Fig.13) 또한 토양의 우라늄함량의 변화양상과도 경향성을 보이지 않았다. 단층선에서 150~180m 지점에서 2,536 pCi/L에 해당하는 라돈이상값이 나타났는데 이는 이 지점의 우라늄함량만으로는 설명할 수 없는

높은 수치로 해당토양에서의 높은 가스투과율에 의해 라돈의 이동이 촉진되었다고 판단된다. 활천리 지역은 전체적으로는 단층의 영향을 크게 받지 않았지만 부분적으로 단층에 의한 구조적인 영향을 받았다고 판단된다.

#### 월산리(WS)

라돈 및 우라늄함량의 분포는 각각 200~710 pCi/L, 0.9~2.3 mg/kg을 나타냈다. 라돈의 함량은 단층선과의 거리가 가까워질수록 증가하는 추세를 보였으며 또한 토양의 우라늄함량과도 같은 경향성을 나타냈다 (Fig.14). 이 지역의 라돈최대함량은 해당토양의 우라늄함량을 고려할 때, 충분히 나타낼 수 있는 값으로 라돈이상치라 보기에는 힘들다고 판단된다. 이 지역의 라돈함량분포는 토양의 우라늄함량과 단층이라는 구조적요인이 복합적으로 나타났다고 판단된다.

#### 화악리(HA)

라돈 및 우라늄함량의 분포는 각각 142~678 pCi/L, 1.4~3.7 mg/kg을 나타냈다. 단층선을 중심으로 좌우 모두 라돈의 농도는 300 pCi/L 정도로 매우 낮았으며, 단층선에서 좌측으로 거리가 멀어질수록 라돈농도가 증가하는 경향을 보였다(Fig.15). 이러한 원인은 이 지역의 단층선 중심부에 존재하는 하천의 영향으로, 하천의 발달로 인해 토양층의 공극속으로 라돈의 발산이 억제되어 토양상부층으로의 라돈의 이동이 제한되었기 때문이다.

#### 햇골(HG)

라돈 및 우라늄함량의 분포는 각각 250~1,525 pCi/L, 1.0~8.0 mg/kg을 나타냈다. 화강암 및 규암층의 접촉부로 보이는 중심선에 가까워질수록 라돈농도가 증가하는 경향을 보였다 (Fig.16). 특히 접촉부 중심에서는 매우 높은 라돈농도를 보였으며, 이는 구조적인 영향으로 판단할 수도 있다. 그러나 기본적으로 이 지역에서의 라돈농도의 분포는 토양중 우라늄의 분포와 유사하여 우라늄에 수반되어 나타나는 라돈상대로 보는 것이 적절하다.

### 5.3 경주지역의 라돈방사능 평가

경주지역의 5개의 subarea에 대해 EPA Radon Index 및 Confidence Level을 적용한 결과, 이 지역의 Radon Confidence Level은 8로 신뢰도는 양호한 수준으로 나타났다. 차후 이 지역의 실내라돈분포 자료와 모니터링 자료를 획득한다면 신뢰도는 매우 높은 수준이 될 것으로 판단된다. Radon Index의 경우, 울동(YD) 및 활천리(HC) 지역의 경우 각각 13을 나타내어 EPA 분류의 경우 매우 라돈방사능의 위험성이 높은 지역으로 분류되었다. Radon Index가 12 이상을 나타낼 경우, 이 지역 실내공간에서의 라돈농도가 4 pCi/L 이상일 확률이 매우 높은 것을 의미한다.

### 5.4 라돈농도분포의 원인분석

이 지역의 총 69개의 시료채취지점 중, 라돈농도가 1,000 pCi/L 이상을 나타내면서 토양의 우라늄함량, 토양의 입도, 현장토양함수율 등의 자료가 확보된 7개 지점에 대해서 라돈농도의 원인을 종합적으로 분석해 보았다(Table 6). 이 중 토양의 입도는 체가름분석(한국공업

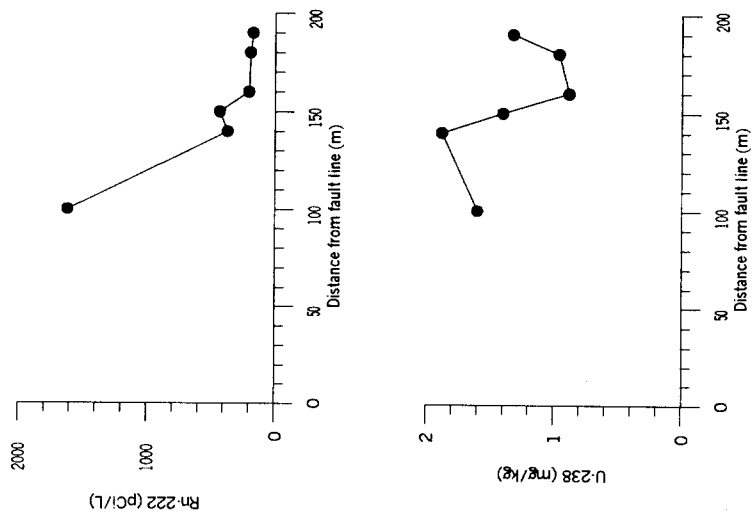


Fig.12 Radon and uranium distributions in MY section.

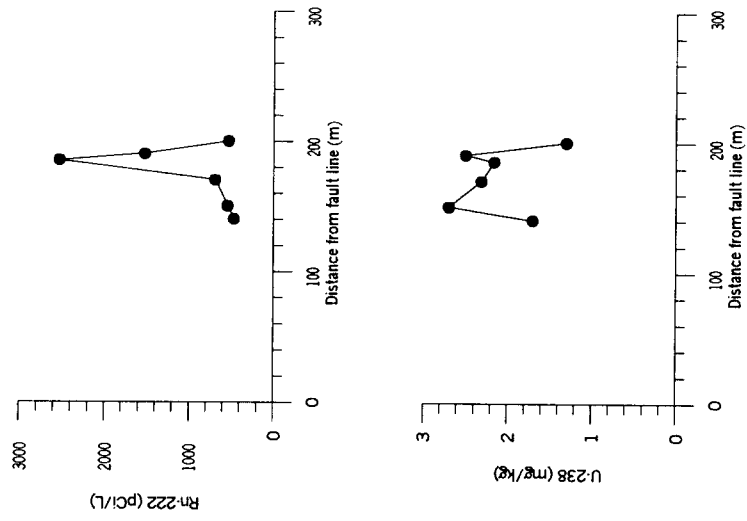


Fig.13 Radon and uranium distributions in HC section.

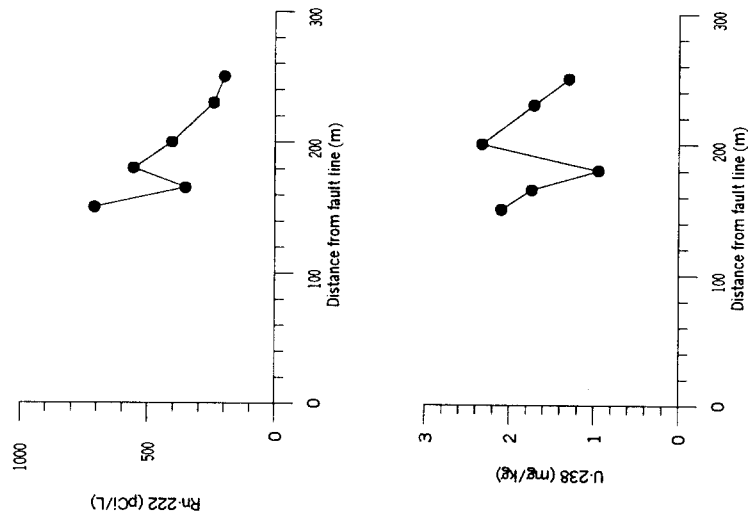


Fig.14 Radon and uranium distributions in WS section.

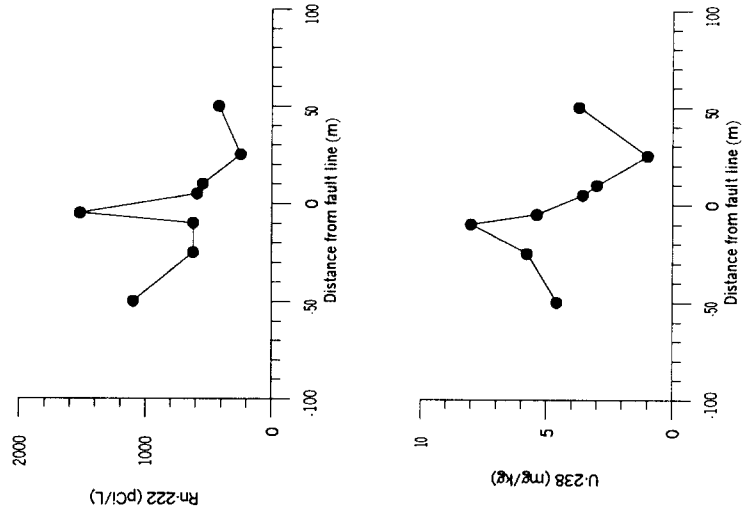


Fig.16 Radon and uranium distributions in HG section.

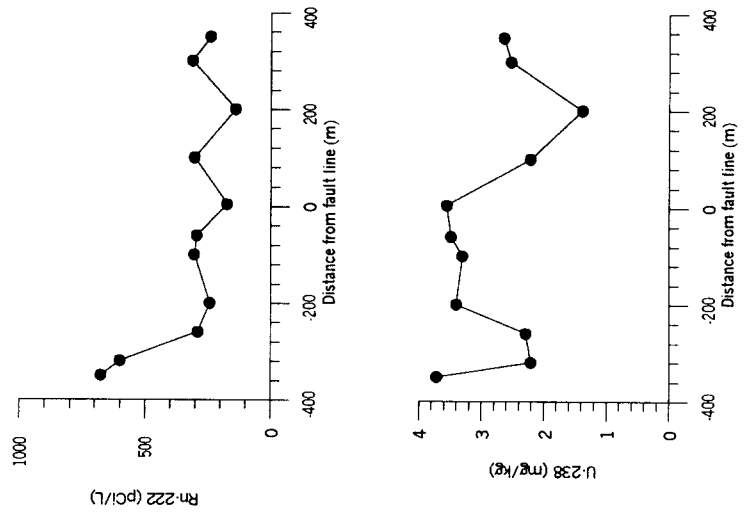


Fig.15 Radon and uranium distributions in HA section.

규격; KS F 2302)을 통하여 측정했으며, 토양의 입도가 대부분 사질토였기에 Hazen이 제시한 수리전도도(Fetter, 1994)를 사용하여 토양의 유체투과율을 간접적으로 반영하였다.

Table 6. Relationship among the high radon values and other factors.

Subarea /sample No.	<sup>222</sup> Rn(pCi/L)	<sup>238</sup> U(mg/kg)	Soil water content(wt.%)	Hazen K(cm/s)	Note
HG1	1,525	5.4	11.3	0.071	Granite
HG4	1,100	4.6	14.2	0.024	Granite
HC3	2,536	2.2	10.0	0.184	Fault zone
MY6	1,619	1.6	10.8	0.189	Fault zone
WJ6	1,991	1.8	12.3	0.128	Fault zone
YD3	1,082	3.8	10.8	0.033	Granite
YD4	1,506	4.5	9.2	0.055	Granite

햇골시료(H1, H4)와 울동시료(YD3, YD4)의 경우 토양가스 중 높은 라돈함량을 나타낸 것은 해당토양에서의 상대적으로 높은 우라늄함량에 기인하였으며 측정된 라돈함량은 발산계수가 0.4정도 일때의 최대라돈농도모델(식(1))과 심도확산 모델(식(2))을 고려할 경우 충분히 가능성이 있는 것으로 판단되었다. 또한 햇골지역 및 울동지역의 경우, 기반암이 화강암이라는 사실이 이 지역의 시료들에서 나타난 라돈이상치를 설명하는데 있어 기초적인 원인을 제공해 주고 있다.

활천리(HC3), 모량리(MY6), 우중골(WJ6) 시료의 경우, 기반암이 변성퇴적암류이기에 토양중 우라늄함량은 2 mg/kg 정도로 상대적으로 낮았으나 1,350 pCi/L 이상의 높은 라돈함량을 보였다. 이들 시료에서 측정된 라돈함량은 발산계수가 최대(=1.0)일 때의 최대라돈농도모델(식(1))과 심도확산모델(식(2))로 구한 이론값을 초과하고 있으며, 이는 이들 측정지점 토양층의 조건이 라돈의 이동에 있어 매우 유리한 조건임을 시사해준다. 즉, 이들 지점에서 라돈농도는 자체 생성량뿐만 아니라 다른 지점에서 이동되어 온 라돈가스를 포함하고 있다고 설명할 수 있다. Hazen에 의해 제시된 수리전도도(Fetter, 1994)의 값을 보면 햇골 및 울동지역 시료의 경우보다 10배 이상 높아 이러한 가능성을 뒷받침해주고 있으며, 이들 지역이 단층대에 위치해 있다는 사실이 라돈이상치를 설명하는데 있어 1차적인 원인을 제공해 주고 있다.

## 6. 결론

본 사례연구결과를 토대로 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

(1) 토양환경에서 라돈방사능 위험지수의 비교결과, 지역별로 가평>서울대학교 관악캠퍼스>보은지역 순서로 라돈방사능의 잠재적 위험성이 높은 것으로 나타났으며, 기반암별로 호상편마암 (BG)>화강편마암 (GG)>화강암 (Gr)>흑색점판암-셰일 (BS)>운모편암 (PS)>셰일-석회암 (SL)>천매암-편암 (PS) 지대 순서로 토양에서 라돈방사능의 잠재적 위험성이 높은 것으로 나타났다.

(2) 지역별 토양가스 중 <sup>222</sup>Rn농도의 차이는 지역의 지질을 구성하는 기반암의 종류에



기인하며 이는 기반암에 따른 U의 지구화학적 분포의 차이가 1차적 원인으로 작용했기 때문이라 판단된다.

(3) 토양에서 라돈발산은 6-16 wt.%의 함수율구간까지는 함수율이 증가함에 따라 라돈발산이 증가하다가 6-16 wt.%의 함수율구간 이후로는 함수율의 증가함에 따라 감소하는 경향을 보여 토양의 함수율이 라돈발산을 지배하는 주요 요인임을 확인하였다.

(4) 토양시료의 방사능 분석결과, 토양의 지구화학적 환경에 따른 원소들의 거동차이로 인해 방사능비평형이 나타나 우라늄의 분포만으로 토양가스중의  $^{222}\text{Rn}$ 을 예측하기에는 단점이 있다고 판단된다.

(5) 토양환경에서 라돈이상대의 가능성을 보이는 화강암지대의 서울대학교 관악캠퍼스 지역을 선정하여 40개의 실내공간에서 라돈농도와 라돈후대핵종농도를 측정된 결과, 라돈농도와 평형상수값의 분포는 실내공간의 건물 내 위치와 환기형태에 의해 영향을 받는 것으로 나타나 지하실에 위치하면서 환기가 불량한 실내공간이 라돈방사능의 위험성이 가장 높은 것으로 판명되었다.

(6) 단층지대에 위치한 일부지역에서 토양가스 중 라돈의 농도분포는 단층작용의 구조적인 영향을 받아 이동성이 증가하여 확산모델로는 설명할 수 없는 라돈이상치가 나타났다. 이와 같은 지역의 경우, 토양가스 중 라돈의 농도를 지배하는 1차적인 요인은 기반암에 근거한 우라늄의 지구화학적 분포특성보다는 토양의 유체투과율과 같은 물성이라고 판단된다.

(7) 이상의 결과를 종합해보면, 인체에 영향을 미치는 라돈방사능의 위험성이 높다고 예상되는 지역은 화강암기반의 지역, 단층지대 그리고 라돈의 발산을 유리하게 하는 적절한 토양의 함수율조건을 가지는 지질환경이라고 요약할 수 있다.

## 참고문헌

- 구성본, 김상기, 최종호, 민성식, 박영수, 1981, 가평 및 울진지역 우라늄광상조사연구: 동력 자원연구소, 113p.
- 김남장, 진명식, 1971, 한국지질도 모량도폭: 국립지질조사소
- 김남장, 홍승호, 1975, 한국지질도 안양도폭: 국립지질광물연구소
- 김동술, 김윤신, 김신도, 신용배, 김성천, 유정석, 1993, 서울시 지하철역내의 라돈 농도분포 및 저감대책: 한국대기보전학회지, 9권, 4호, p.271-277.
- 김옥준, 김서운, 유병화, 박병권, 1974, 한국지질도 가평도폭: 국립지질광물연구소
- 김옥준, 이대성, 이하영, 1977, 한국지질도 보은도폭: 국립지질조사소
- 이진수, 1997, 옥천대 흑색셰일 및 점판암 분포지역에서의 잠재적 독성원소 들의 분산과 부화: 서울대학교, 박사학위논문, 234p.
- 제현국, 강치구, 전효택, 1998a, 기반암에 따른 토양가스  $^{222}\text{Rn}$ 농도의 분포에 관한 기초연구: 자원환경지질, 31권, 5호, p.415-424.
- 제현국, 강치구, 전효택, 1998b, 서울대학교 관악캠퍼스 지역에서의 실내 라돈농도 분포: 자원환경지질, 31권, 5호, p.425-430.
- 홍영국, 김승오, 김통권, 1997, 서울 지하철역 승강장 및 토양내 유해라돈함량 연구: 자원환경지질, 31권, 3호, p.215-222.
- Barretto, P.M.C., Physical characteristics of radon-222 emanation from rocks, soils and

- materials, in; The natural radiation environment II, v.2; National Technical Information Service, Springfield, VA, p.731-740.
- BPA(Bonneville Power Administration), 1989, Estimation of Radon Potential in the Pacific Northwest Using Geological Data: U.S. Geological Survey, VA, 146p.
- Damkjaer, A., 1985, Measurement of the emanation of radon-222 from Danish soils: The Science of the Total Environment, v.45, p.343-350.
- Durrance, E.M., 1986, Radioactivity in Geology: John Wiley and Sons, 441p.
- EPA(Environmental Protection Agency), 1992, A Citizen's Guide To Radon: EPA, ANR-464, 4022-K-92-001.
- Fetter, C.W., 1994, Applied hydrogeology: Macmillan College Press, 691p.
- Gundersen, L.C.S. and Wanty, R.B., 1991, Field studies of Radon in Rocks, Soils and Water: U.S. Geological Survey Bulletin 1971, 334p.
- Ivanovich, M. and Harmon, R.S., 1992, Uranium-series Disequilibrium: Clarendon Press, Oxford, 910p.
- Je, H.K., Kang, C. and Chon, H.T., 1999, A Preliminary Study on Soil-gas Radon Geochemistry according to Different Bedrock Geology in Korea: Environmental Geochemistry and Health, v.21, p.117-131.
- Leslie, G.B. and Lunau, F.W., 1992, Indoor air pollution: Cambridge university press, p.99-116.
- Lindmark, A., 1985, Radon in soil gas-exhalation tests and in situ measurements: The Science of the Total Environment, v.45, p.397-404.
- Morse, R.H., 1976, Radon Counters In Uranium Exploration: I.A.E.A.-N.E.A. International Symposium on the Exploration of Uranium Ore Deposits, Vienna, I.A.E.A. pub. no. IAEA-SM-208/55.
- SCINTREX, 1994, Operation manual RDA-200, 52p.
- Titayeva, N.A., 1994, Nuclear Geochemistry: CRC press, 296p.
- Wilson, C., 1987, Radon-Geological aspects of environmental problem: The Amateur Geologist, v.11, n.2, p.17-33.