

기반암에 따른 토양가스 ^{222}Rn 농도의 분포에 관한 기초연구

제현국* · 강치구* · 전효택**

A Preliminary Study on Soil-Gas ^{222}Rn Concentrations Depending on Different Bedrock Geology

Hyun-Kuk Je*, Chigu Kang* and Hyo-Taek Chon**

ABSTRACT : In order to investigate soil-gas ^{222}Rn concentrations, Kwanak Campus (Seoul National University), Boeun (Choong-buk) and Gapyung (Kyonggi) areas were selected and classified depending on their base rock types. Radon risk indices of these study areas decrease in the order of Gapyung>Kwanak Campus>Boeun areas, and in the order of rock type as banded gneiss>granite gneiss>granite>black slate-shale>mica schist>shale-limestone>phyllite-schist. Radon emanating trends with water content and grain size of soils were assessed by modified Morse 3 min. method. Radon emanation increases with the increase of water content in soils which is lower than 6~16 wt.%, and decreases in the range of higher than 6~16 wt.%. It shows that Rn emanation increases with the decrease of soil grain size. Radioactivity analysis of radionuclides of ^{238}U series in some soil samples shows that radioactive disequilibrium state between ^{226}Ra and ^{238}U exists owing to different geochemical behavior of each radionuclide, and, it is necessary to carry out radioactive isotope geochemical approach for soil-gas ^{222}Rn study.

서 론

Radon (Rn)은 U과 Th방사능계열에서 Ra의 방사능 붕괴로 생성되는 기체로, 인체에 흡입될 경우 Rn후대핵종인 Po의 α 붕괴에 의해 폐암을 일으킬 수 있는 유해성 물질이다. Radon에 의한 미국내 사망자수는 연간 7,000~30,000명 정도로 폐암발생을 일으키는 원인 중 흡연에 이어 두번째로 높은 것으로 알려져있다 (EPA, 1992). Radon에 의한 방사능피폭의 문제가 심각한 것임에도 불구하고 국내에서는 환경위해요소로서의 인지도가 매우 부족하며, 이에 대한 환경적 측면의 연구도 '대전시 지역 라돈 환경 지화학 연구' (홍영국, 1997)와 '서울시 지하철역내의 라돈농도 분포 및 저감대책' (김동술 등, 1993) 등에 불과한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지질환경에서 라돈방사능에 관한 기초연구를 수행하고자 서울대

학교 관악캠퍼스, 충청북도 보은 및 경기도 가평 지역을 선정하고 해당지역을 다시 기반암별로 구획화하여 실내 Rn유입의 주근원이 되는 토양가스 중 ^{222}Rn 농도를 잔류 토양에서 측정하였다. 또한 토양에서의 라돈방사능 위험지수 (radon risk index)를 도출하여 지역별, 기반암별 구획에서 라돈방사능의 위험도를 상대적으로 비교하였으며, 세부연구로서 Geiger-Müller counter로 측정된 지표방사능값과 토양가스 중 ^{222}Rn 농도와의 관련성을 평가하였으며 토양의 함수율 및 입도에 따른 라돈발산의 경향을 실험을 통해 간접적으로 예측하였다. 또한 일부 토양시료의 ^{238}U 계열 원소들의 방사능을 측정하여 방사능지구화학적 고찰의 중요성을 제안하였다.

연구 및 분석방법

토양가스의 채취는 각 기반암의 잔류토양에서 실시하였으며 동일지점에서 Geiger-Müller counter를 이용하여 지표방사능을 cpm (count per minute)단위로 측정하였다. ^{222}Rn 의 측정에 사용된 검출기는 캐나다 SCIN-TREX사의 RDA-200이며 방사능 붕괴시 생성된 α 입자가 황화아연 (ZnS)으로 내부벽면이 도포된 광전자증폭

* 서울대학교 대학원 자원공학과 (Department of Mineral & Petroleum Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

** 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 (School of Civil, Urban, and Geosystem Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea), E-mail: chon@plaza.snu.ac.kr

기 (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}Rn 농도의 계산은 Morse의 3분 측정방법 (Morse, 1976)을 이용하였으며, 매 측정마다 측정셀의 방사능 배경값을 측정하였고 표준셀을 이용하여 측정된 Rn농도 (cpm)값을 오차 $\pm 10\%$ 로 보정하였다. 토양의 함수율과 라돈발산의 관계를 간접적으로 예측하기 위해 연구지역의 토양시료 6~10 kg을 이용하였으며, 보은지역은 흑색점판암지대의 잔류토양을, 가평지역은 화강편마암지대의 잔류토양을 선택하였다. 토양시료에 대해 유발과 공을 이용하여 시료를 분쇄한 후 -10 mesh (>2 mm), -20 mesh (>0.84 mm) 격자망을 가진 체를 이용하여 +10 mesh, -10 mesh~+20 mesh, -20 mesh로 토양입도를 3종류로 분리한 후 플라스틱

상자에 담아 일정량의 증류수를 분리된 토양시료에 균등하게 첨가하였으며 최종적으로 각각 1 l의 플라스틱 용기에 토양시료를 가득 채운 후 Rn농도를 측정하였다. 측정 후 1 l 플라스틱 용기속의 토양 수 g을 채취하여 함수율측정을 시행하였으며 증류수를 계속 첨가하여 위의 실험절차를 수회 반복하여 증가된 함수율과 Rn농도의 관계를 얻었다. 또한, 측정된 토양가스 중 ^{222}Rn 농도가 Wilson (1987)이 제시한 환경기준치인 1,350 pCi/L 이상이거나 근접한 값을 보인 측정지점의 토양시료 10개에 대해서 기초과학지원연구소에 의뢰하여 ^{238}U , ^{234}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb 의 방사능을 측정하였다.

연구지역의 지질 및 시료채취

서울대학교 관악캠퍼스

본 연구지역은 행정구역상 서울특별시 관악구 신림동

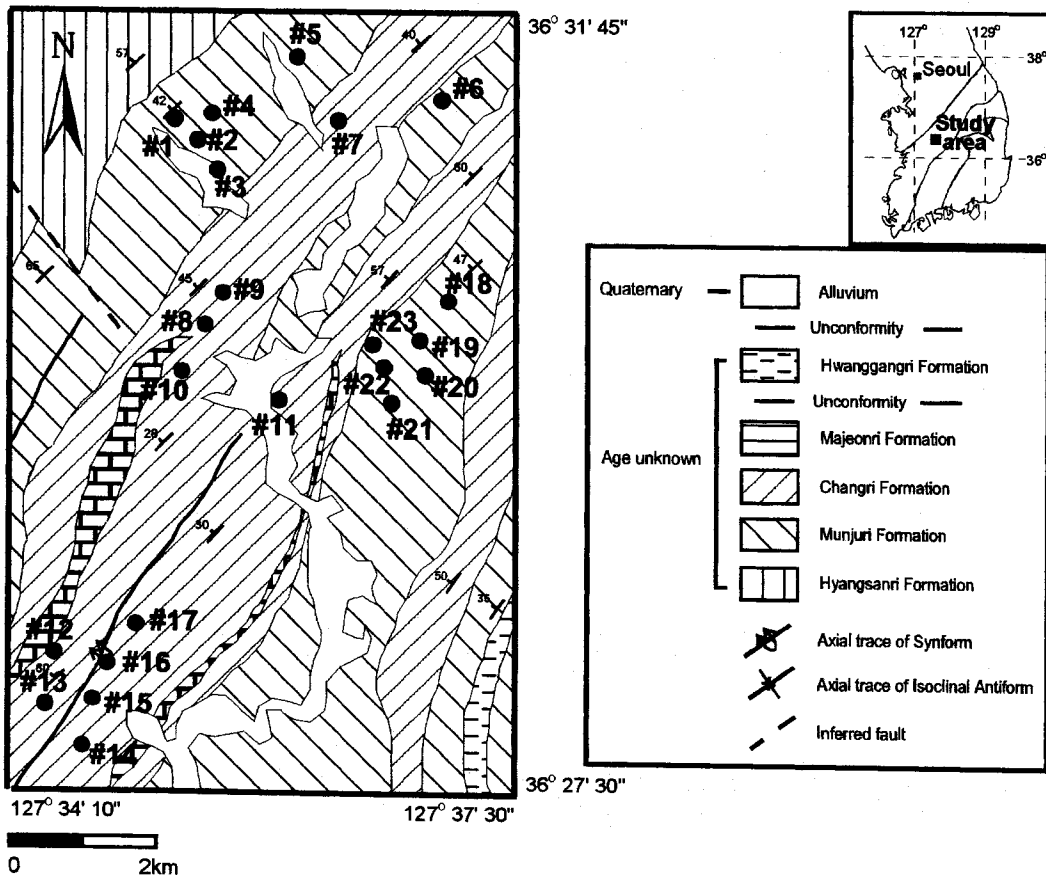


Fig. 1. Geologic map and sampling location of Boeun area (modified from Kim *et al.*, 1977).

에 위치하는 서울대학교 관악캠퍼스 전역이다. 기반암은 주라기 대보화강암으로 암체는 암주상을 이루며 북동 방향으로 향한 타원형에 유사한 분포상을 보이며 화강암의 절리면들은 주로 일차적 장력 절리로서 남동과 북동의 경사면을 가진 것이 우세하게 나타나며 흑운모 호상편마암을 관입하였고 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 $36^{\circ}27'30''\sim 36^{\circ}32'00''$, 경도 $127^{\circ}34'00''\sim 127^{\circ}37'30''$ 에 위치하는 충청북도 보은군 일부이다. 지질은 Fig. 1에서와 같이 하부로부터 캄브리아기의 백봉리층군 및 시대미상의 옥천계를 이루는 변성퇴적암류, 고생대초기의 조선계 해성퇴적암류, 고생대후기의 평안계 육성퇴적층과 이를 관입한 주라기의 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 $37^{\circ}49'00''\sim 37^{\circ}51'00''$, 경도 $127^{\circ}30'30''\sim 127^{\circ}32'30''$ 에 위치하는 경기도 가평군 가평읍 읍내리 일대와 강원도 춘성군 남산면 서천리 일대이며 이 지역은 1980년도에 동력자원연구소에 의해 보납산 일대의 우라늄광상탐사 조사가 수행되었던 곳이다. 지질은 선캠브리아시대의 변성암류와 이를 관입한 화성암류로 대별되어 하부로 부터 선캠브리아시대 장락층군의 장락산규암층과 삼산현층, 고기화성암류의 우백질 화강편마암과 이를 부정합으로 덮는 충적층이 강변을 따라 발달되어 있다 (김옥준 등, 1974) (Fig. 2). 본 연구지역을 지질도의 내용과 현장관찰을 병행하여 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 구획화 하였으며 1997년 8월16일에 MS지대에서 5개, BG지대에서 7개, GG지대에서 8개씩 총 20개의 토양가스 및 토양시료를 채취하였다.

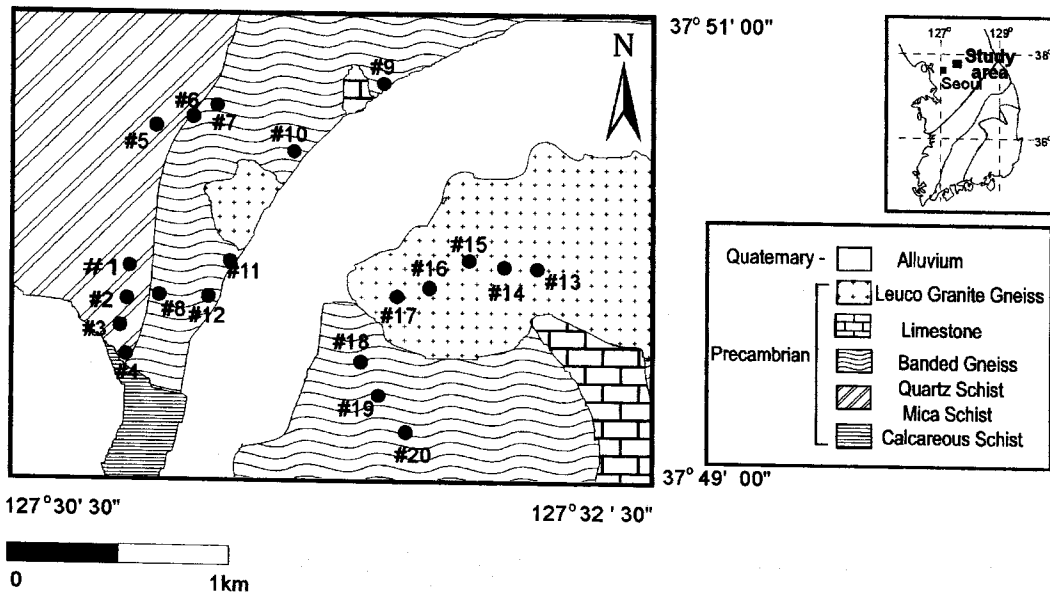


Fig. 2. Geologic map and sampling location of Gapyung area (modified from Kim et al., 1974).

Table 1. Average and range of ^{222}Rn concentrations and surface radioactivity in Kwanak Campus, Seoul National University.

	Mean	Median	Geo.mean	Range	No. of samples (>1,350 pCi/L)
^{222}Rn (pCi/L)	822	809	669	110~1,426	1
Surface radioactivity (cpm)	79	85	71	30~120	

No. of samples : 10

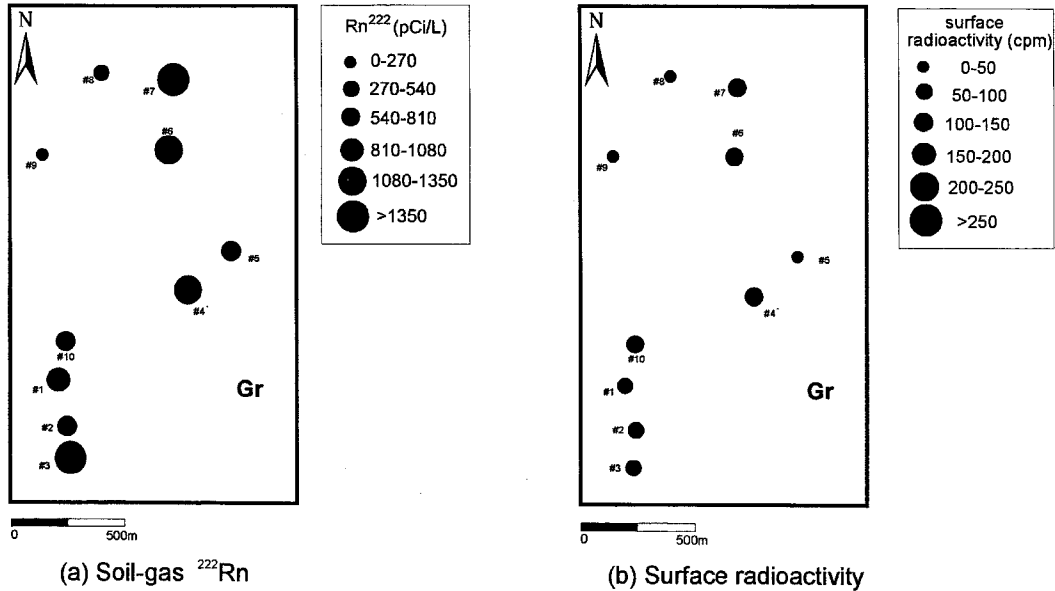


Fig. 3. Soil-gas ^{222}Rn concentration and surface radioactivity map in Kwanak campus.

결과 및 고찰

토양가스 중 ^{222}Rn 농도 측정

서울대학교 관악캠퍼스지역의 토양가스 중 ^{222}Rn 농도 및 지표방사능값의 측정결과, ^{222}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}Rn 농도와 지표방사능값의 분포를 살펴보면 연구지역의 공간적 제한성에 의해 뚜렷한 경향이 나타나지는 않은 것으로 판단된다 (Fig. 3). 일부 토양가스시료에서 비교적 높은 ^{222}Rn 농도가 측정되었는데 이러한 1차적 원인은 관악캠퍼스지역의 기반암이 화강암이기 때문이라 판단된다. 화강암의 경우 암석의 생성환경상 일반적으로 U의 농도가 높으며, 라돈발산율이 15%, 라돈방사능이 한 시간당 4×10^{-3} pCi/g 정도로 기타 화성암 및 퇴적암에 비해 가장 높은 값을 가진다고 알려져 있으며, 화강암지대의 토양층에서의 방사능은 약 1.6 pCi/g로 토양 방사능배경값

Table 2. Average and range of soil-gas ^{222}Rn concentrations, surface radioactivity and U in soils from the Boeun area.

	Mean	Median	Geo.mean	Range
^{222}Rn (pCi/L)	606	499	532	180~1,293
Surface radioactivity (cpm)	98	80	79	20~260
U (ppm)	6.1	6.4	6.1	3.1~9.6

No. of samples : 23

의 두 배 정도로 알려져 있다 (Barretto, 1972).

보은지역의 토양가스 중 ^{222}Rn 농도 및 지표방사능값의 측정결과, 전체 23개의 토양가스시료 중 ^{222}Rn 농도가 1,350 pCi/L를 초과한 시료는 없었으며 토양가스 중 ^{222}Rn 의 농집범위는 180~1,293 pCi/L, 평균농도는 606 pCi/L을 나타냈으며, 지표방사능값은 20~260 cpm의 범위에 평균 98 cpm을 나타냈다 (Table 2). 이를 기반암별로 분류하면, SL지대에서는 ^{222}Rn 의 평균농도가 464 pCi/L이며, BS지대에서는 평균 793 pCi/L, PS지대에서는 평균 328 pCi/L이고, 지표방사능값의 경우 SL지대에

Table 3. Mean of soil-gas ^{222}Rn concentrations, surface radioactivity and U in soils derived from different base rocks from the Boeun area.

Bed rock	^{222}Rn (pCi/L)	Surface radioactivity(cpm)	U(ppm)	No. of samples (>1,350 pCi/L)
SL* (N**=6)	464	83	6.4	0
BS (N=120)	793	113	7.0	0
PS (N=5)	328	78	3.8	0

* SL : Shale-Limestone, BS : Black slate-Shale, PS : Phyllite-Schist

** N : No. of samples

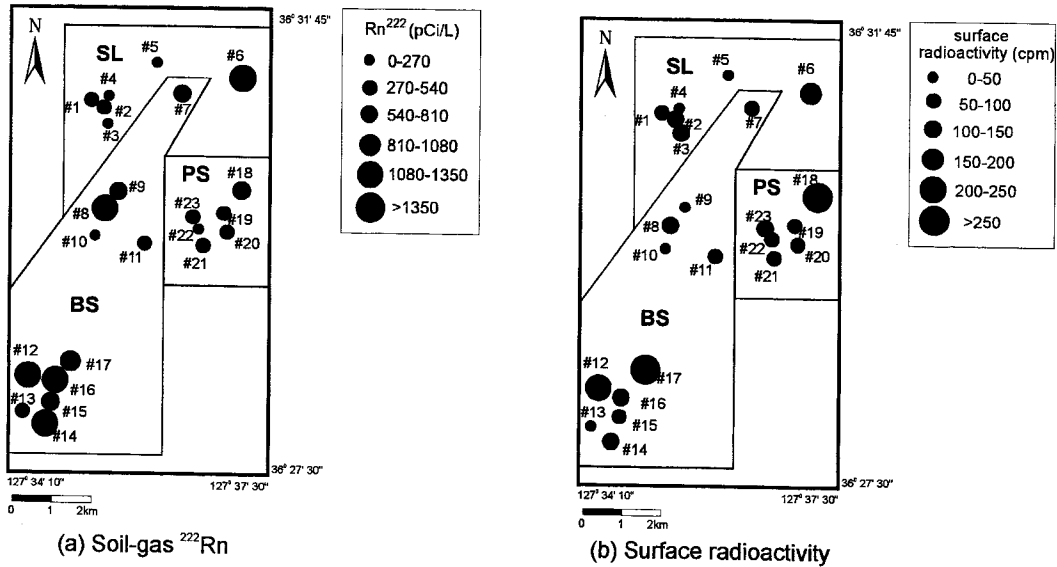


Fig. 4. Soil-gas ^{222}Rn concentration and surface radioactivity map in the Boeun area.

서는 평균 83 cpm, BS지대에서는 평균 113 cpm, PS지대에서는 평균 78 cpm으로 BS>SL>PS 순서로 토양가스 중 ^{222}Rn 농도 및 지표방사능값이 분포되었음을 알 수 있다 (Table 3, Fig. 4). 측정된 토양가스 중 ^{222}Rn 농도를 토양의 U농도와 비교하기 위해 이진수 (1997)에 의해 연구된 보은지역의 토양 중 U농도를 이용하였는데 토양가스 채취지점과 인용된 자료의 위치가 같은 경우는 그대로 이용하였으나 위치가 다른 경우는 krigging 방법을 통해 값을 환산하여 적용시켰다. 23개의 시료채취 지점에 대한 토양중 U농도는 평균 6.1 ppm이며 기반암별로 분류한 경우, SL지대에서는 6.4 ppm, BS지대에서는 7.0 ppm, PS지대에서는 3.8 ppm으로 토양 중 U농도도 BS>SL>PS 순서로 분포되어 나타났다 (Table 3). 23개의 시료채취지점에 대한 토양의 U농도와 토양가스 중 ^{222}Rn 농도와의 관계는 결정계수 R^2 이 0.52로 양의 상관관계 ($\alpha=0.01$) 임이 나타났다. 이는 ^{238}U 에서 ^{226}Ra 로 이어지는 방사능 계열이 비교적 closed system에 가까운 환경에서 분포한다는 것을 의미하며 또한, SL, BS,

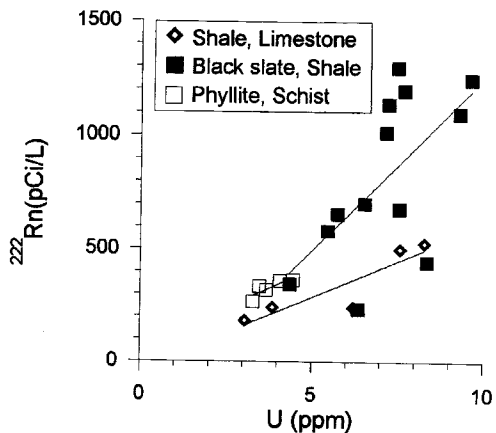


Fig. 5. Relationship between soil-gas ^{222}Rn concentration and U content in soils from various bed rock types in the Boeun area.

PS지대별로 분류하였을 때의 관계를 살펴보면, SL, PS 지대의 $^{222}\text{Rn}/\text{U}$ 비에 비해 BS지대의 $^{222}\text{Rn}/\text{U}$ 비가 큼을 알 수 있는데 (Fig. 5), 이는 BS지대에서의 ^{226}Ra 의 방사

Table 4. Average and range of soil-gas ²²²Rn concentrations and surface radioactivity from the Gapyung area.

	Mean	Median	Geo.mean	Range
²²² Rn(pCi/L)	1,082	702	809	255~4,943
Surface radioactivity (cpm)	141	125	134	70~240

No. of sample : 20

Table 5. Mean of soil-gas ²²²Rn concentrations and surface radioactivity with different base rocks from the Gapyung area.

Bed rock	²²² Rn (pCi/L)	Surface radioactivity (cpm)	No. of samples (>1,350 pCi/L)
MS* (N**=5)	443	108	0
BG (N=7)	1,179	139	1
GG (N=8)	1,396	164	3

능이 크거나 ²²²Rn의 발산능력이 상대적으로 다른 지대에 비해 높음을 간접적으로 의미한다.

가평지역의 토양가스 중 ²²²Rn농도 및 지표방사능값의 측정결과, 20개의 토양가스시료 중 ²²²Rn농도가 1,350 pCi/L를 초과한 시료는 4개였으며 BG지대에서 1개, GG지대에서 3개였다. 토양가스 중 ²²²Rn의 농집범위는 255~4,943 pCi/L, 평균농도는 1,082 pCi/L을 나타냈으며 지표방사능값은 70~240 cpm의 범위에 평균 141 cpm을 나타냈다 (Table 4). 이를 기반암별로 분류하면 MS지대에서는 ²²²Rn의 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 ²²²Rn농도 및 지표방사능값이 분포되었음을 알 수 있다 (Table 5, Fig. 6). 가평지역의 토양가스 중 ²²²Rn농도의 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 ²²²Rn농도가 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 라돈발산을 및 라돈방사능에 기인한 것으로 예상되는데 편마암의 경우 라돈발산율이 15%, 라돈방사능이 한 시간당 1×10⁻³ pCi/g 정도로 화강암 다음으로 높은 것으로 알려져 있다 (Barretto, 1972). 또한 호상편마암지대 및 화강편마암지대의 일부가 변성작용을 받아 암석의 mylonite화

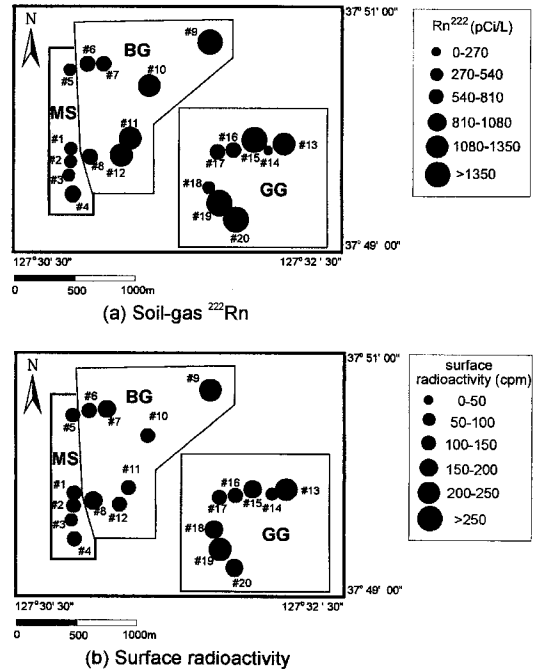


Fig. 6. Soil-gas ²²²Rn concentration and surface radioactivity map in the Gapyung area.

가 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 U의 이동도와 농도에도 변화가 일어난다고 알려져 있으며 광물의 입도감소에 기인하여 함우라늄광물에서 U의 방출이 일어나며 또한 암석의 결정 재배열에 의해 oxidizing fluid와 방출된 U과의 작용이 일어나 산화용액에 의한 U의 분포가 변화하여 궁극적으로는 Rn의 발산이 촉진된다고 알려져 있다 (Gun-dersen and Wanty, 1991).

지표방사능값과 토양가스 중 ²²²Rn농도와의 비교

서울대학교 관악캠퍼스, 보은, 가평지역의 지표방사능값과 토양가스 중 ²²²Rn농도와의 관계는 각각 결정계수 R²이 0.55, 0.37, 0.41로 세 지역 모두 측정요소간의 양의 상관관계 (α=0.01)를 나타냈다 (Fig. 7). Radon이 유일한 가스상 방사능물질이기때 토양가스에서 측정된 ²²²Rn농도와 동일 지점의 지표대기에서 Geiger-Müller counter로 측정된 값이 본 연구지역에서 통계적으로 유의한 상관관계를 보였다 고 판단되나 토양에서 지표대기로 발산되는 Rn의 양이 토양의 물리적 특성에 의해 영향을 받고 또한 ²²²Rn 농도는

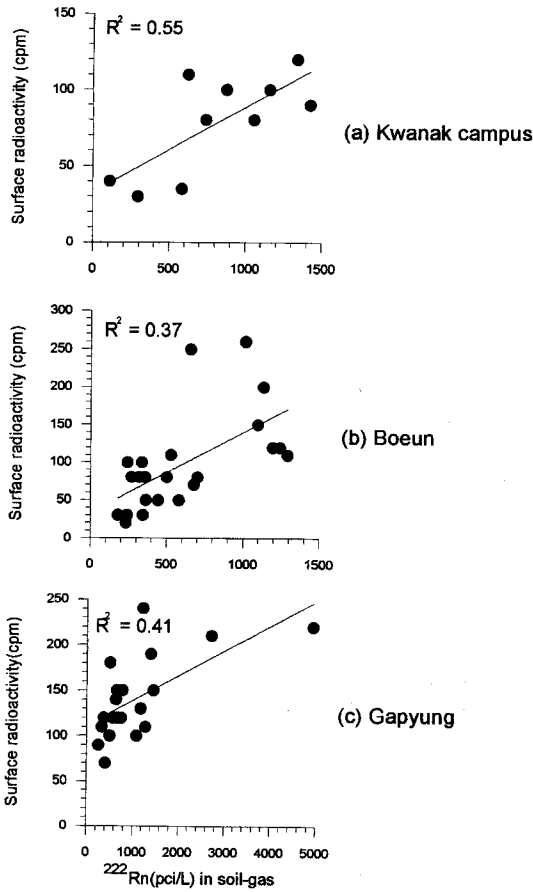


Fig. 7. Relationship between surface radioactivity and soil-gas ²²²Rn concentration in samples from three study areas.

α방사능에 의해 측정된 것이기에 β, γ방사능을 측정하는 반정량적인 Geiger-Müller counter와의 원리상 차이가 존재하므로 지표방사능값은 토양에서 Rn의 이상대를 탐지하기 위한 참고수치로서 의미가 있는 것으로 판단된다.

연구지역의 라돈방사능 위험도의 비교

서울대학교 관악캠퍼스, 보은, 가평지역의 토양가스 중 ²²²Rn의 평균농도를 비교한 결과, 가평>관악캠퍼스>보은 순서로 나타났으며, 기반암별로 구획화한 경우 토양가스 중 ²²²Rn의 평균농도를 비교한 결과, GG(화강편마암)>BG(호상편마암)>Gr(화강암)>BS(흑색점판암-세일)>MS(운모편암)>SL(세일-석회암)>PS(천매암-편암) 순서로 나타났다. 지역별로 t-test를 수행한 결과, 보은지역과 가평지역간의 토양가스 중 ²²²Rn농도의 평균값만 유의한 차이를 나타냈을 뿐 (P<0.01) 관악캠퍼스지역과 가평지

역, 보은지역과 가평지역간에는 유의한 차이를 나타내지 못했다 (P>0.01). 보은지역을 기반암별로 구획화한 경우 SL지대와 BS지대간의 토양가스 중 ²²²Rn농도의 평균값은 유의한 차이를 나타냈으나 (P<0.01) 다른 경우에는 유의한 차이를 나타내지 않았다 (P>0.01). 가평지역을 기반암별로 구획화한 경우 MS지대와 BG지대, MS지대와 GG지대간의 토양가스 중 ²²²Rn농도의 평균값은 유의한 차이를 나타냈으나 (P<0.01) BG지대와 GG지대간의 평균농도의 유의한 차이는 나타나지 않았다 (P>0.01). 토양가스에 존재하는 ²²²Rn은 ²³⁸U방사능 계열이어서 기반암과 잔류토양에 따른 U분포의 지구화학적 차이가 존재하여 기반암별 ²²²Rn농집의 차이가 발생할 수는 있으나 U의 지구화학적 분포는 토양가스 중 ²²²Rn의 분포형성에 1차적 요인의 역할만 할 뿐 토양함수율, 토양구조, ²²⁶Ra의 분포 등과 같은 복합적 2차적 요인에 의해서도 ²²²Rn농도가 영향을 받는 것으로 판단된다. 동일 지역이나 동일 기반암 구획에서 토양가스 중 ²²²Rn농집의 범위가 매우 크고, 위의 통계적 기법으로는 토양가스 중 라돈방사능의 위험성을 지역별, 기반암별로 상호 비교하는데 어려움이 있다고 판단되어 라돈방사능 위험지수 (radon risk index)를 도출하여 이를 비교하였다. 라돈방사능 위험지수는 Wilson (1987)이 제시한 토양가스 중 ²²²Rn농도의 환경기준치가 1,350 pCi/L라는 점에 착안하여 이 값을 6등분하여 각각의 해당범위에 1부터 6까지의 점수를 부여한 후 측정된 토양가스 중 ²²²Rn농도를 점수화하여 한 지역 (구획)에서 측정된 시료 수 만큼 점수를 합산한 후 계산될 수 있는 최대값으로 나누는 것으로 정의되며 계산된 라돈방사능 위험지수는 지역별 또는 구획별로 토양가스 중 ²²²Rn농도에 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 6). 이 결과로부터 퇴적암지대 보다는 화강암으로 대표되는 화성암지대에서 토양가스 중 높은 ²²²Rn농도와 화성암이 변성작용을 받았을 경우 매우 높은 ²²²Rn농도를 예상할 수 있다고 판단된다. 그러나 본 연구지역 중 하나인 편암류의 변성암지대의 경우 토양층의 발달이 미약하여 낮은 ²²²Rn농도가 측정된 것으로 예상된다.

Table 6. Radon risk index in soil derived from different bedrock types in three study areas.

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

* Gr; Granite, SL; Shale-Limestone, BS; Black Slate-Shale, PS; Phyllite-Schist, MS; Mica Schist, BG; Banded Gneiss, GG; Granite Gneiss

토양함수율 및 입도에 따른 라돈발산의 경향

본 실험에서의 Rn농도 측정방법은 현장 토양가스 중 ²²²Rn 측정방법인 Morse의 3분측정방법 (Morse, 1976) 과 유사하나 측정된 Rn농도의 단위는 1분간 측정 한 cpm으로, 이는 ²²²Rn의 농도뿐만 아니라 ²²⁰Rn농도도 포함 된 값이다. Rn농도의 가변성으로 인한 1회 측정의 오차 를 줄이기 위해 4회씩 측정 한 평균값을 이용하였으며 토 양가스 채취와 동일하게 Morse의 3분 측정방법 (Morse, 1976)을 하지 않은 것은 시간적 제약성이 있기 때문이다. 본 실험의 결과, 관악캠 퍼스지역 토양의 경우, 2 mm이 상의 입도와 0.84~2 mm 입도의 경우 10.3 wt.%의 함수 율에서 최대 Rn농도를 보였으며, 0.84 mm 미만의 입도의 경우 6.4 wt.%의 함수율에서 최대 Rn농도가 나타났다. 보은지역 토양의 경우, 2 mm이 상의 입도와 0.84~2mm 입도의 경우 11.8 wt.%의 함수율에서 최대 Rn농도를 보 였으며 0.84 mm 미만의 입도의 경우 16.5 wt.%의 함수 율에서 최대 Rn농도가 나타났다. 가평지역 토양의 경우, 2 mm이 상의 입도와 0.84~2 mm 입도의 경우 16.1 wt.% 의 함수율에서 최대 Rn농도가 나타났으며, 0.84 mm 미 만의 입도의 경우 14.6 wt.%의 함수율에서 최대 Rn농도 가 나타났다. 또한 토양의 입도가 >2.00 mm → 0.84~ 2.00 mm → <0.84 mm로 작아질수록 동일한 토양함수율 에서 측정된 Rn농도가 커지는 경향이 나타났는데, 이는 입도감소에 의한 토양입도의 비표면적 증가에 의해 궁극 적으로 라돈발산이 용이해졌기 때문이라 판단된다. 관악 캠 퍼스, 보은, 가평지역의 토양함수율과 Rn농도와의 관계 를 살펴보면, 토양에서 Rn농도는 토양함수율의 증가에 따 라 같이 증가하는 경향을 보이다가 일정 함수율 이상에서 는 함수율의 증가에 반비례하게 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다. 본 실험에서는 전체적으로 6~16 wt.%의 함

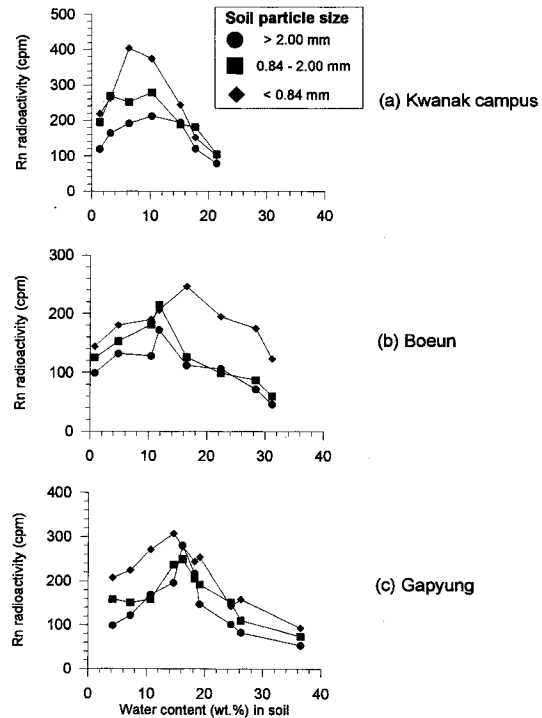


Fig. 8. Relationship between water content and radon radioactivity depending on grain of soil samples in the three study areas.

수율 구간까지는 Rn농도가 증가하다가 그 이후로는 감소 하는 경향을 나타냈다 (Fig. 8). Lindmark (1985)에 의하 면 토양에서 Rn의 발산은 토양의 함수율이 15~17 wt.% 에 이를 때까지 함수율에 비례하여 증가하며 그 이상의 경우는 감소한다고 하였으며 토양함수율이 약 30%에 이 를 때까지 비례하여 Rn농도가 증가한다고도 알려져있다 (BPA, 1989). 본 실험에서도 유사한 경향을 보였는데 이 런 현상은 토양입자를 둘러싸고 있는 물 (공극수)이 Rn

Table 7. Radioactivity of ²²⁶Ra, ²³⁸U and ²³⁴U is soil samples from three study areas (unit in pCi/g).

No.	Area	²²⁶ Ra	²³⁸ U	²³⁴ U
1	Kwanak	1.60	nd*	nd
2	Kwanak	3.01	3.18	3.18
3	Kwanak	2.29	nd*	nd
4	Kwanak	2.59	2.41	2.24
5	Boeun	1.42	1.52	1.45
6	Boeun	0.99	1.27	1.24
7	Gapyung	1.33	1.50	1.56
8	Gapyung	1.95	nd	nd
9	Gapyung	1.20	1.34	1.23
10	Gapyung	2.72	4.29	4.38

* nd: not determined

의 recoil에 의한 정역학적 에너지를 흡수하여, Rn원자가 인접해 있는 토양입자에 다시 되붙혀 활동성을 잃게 되는 현상을 방지하고 공극수에 있는 Rn원자가 역산화산을 통해 공극으로 이동을 도와 궁극적으로 암석이나 광물, 토양입자에서의 Rn의 발산을 도와주기 때문이라 판단된다. 그러나 일정량 이상의 함수율을 가진 경우에는 공극수로 인해 두꺼운 막 (film)이 형성되어 Rn원자의 확산길이 (diffusion length)를 감소시켜 Rn의 발산속도는 다시 감소하는 것으로 설명 될 수 있다 (Damkjaer, 1985).

방사능지구화학적 고찰

방사능분석의 결과는 Table 7과 같다. 측정된 7개 토양 시료의 ²³⁴U/²³⁸U의 비는 0.92~1.02의 범위를 보여 ²³⁸U과 ²³⁴U간의 방사능 비평형은 전반적으로 크게 일어나지 않은 것으로 판단된다. 일반적으로 토양에서 ²³⁴U/²³⁸U의 비는 1이하로 알려져 있는데 (Titayeva, 1994) 관악캠퍼스지역의 2개 시료, 보은지역의 2개 시료, 가평지역의 1개 시료에서 1이하의 값을 보여 대체로 일치하는 경향을 보였다 (Fig. 9). ²²⁶Ra/²³⁸U의 비의 경우, 0.63~1.08의 범위를 보였으며, 전반적으로 1에 가까운 ²³⁸U 부화현상이 나타났다. 토양에서는 일반적으로 U이 Ra에 비해 선택적으로 용탈되고 U보다 Ra이 Fe, Mn산화물과 유기물, 점토광물에 흡착이 잘 되기에 Ra이 상대적으로 부화된다고 알려졌으나 (Ivanovich and Harmon, 1992), 본 측정결과에서는 4번 시료를 제외하곤 전부 Ra이 결핍되어 있는 결과가 나타났다. ²²⁶Ra의 모핵종인 ²³⁰Th이 ²³⁴U에 비해 결핍되었다고 예측할 수는 있으나 토양에서 ²³⁴U이 용탈되기 쉬운점과 Th이 지구화학적으로 물에 잘 용해되지 않은 특성을 고려할 때 회복한 것으로 판단된다. 그러나, ²³⁸U~²²⁶Ra간의 방사능 비평형은 전적으로 U을 함유한 광물의 안정성과 연관

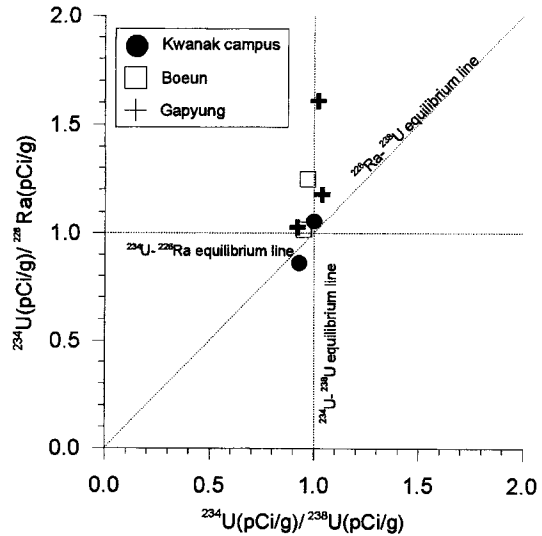


Fig. 9. Diagram showing disequilibrium state of ²³⁸U-series radioactivity in soils from three study areas.

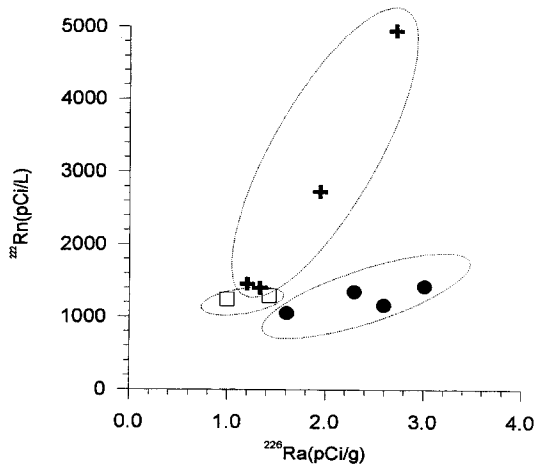


Fig. 10. Diagram showing the relationship between ²²⁶Ra concentration in soil and soil-gas ²²²Rn concentration from three study areas.

되어 있다는 관점에서 보면, 토양에서 U이 쉽게 풍화되는 광물에 위치하지 않고 풍화에 대해 저항력이 큰 광물에 위치하고 있다면 방사능붕괴에 의해 생성된 ²²⁶Ra만이 광물의 radiation-damaged zone에서 용탈될 수 있다고 판단된다. 또한 U이 V 또는 인산염에 의해 고정된 경우 ²²⁶Ra은 상대적으로 쉽게 용탈되어 ²²⁶Ra/²³⁸U의 비가 1보다 작은 값을 보일 수 있다고 판단되며, Ra의 존재형태가 RaCl₂, RaBr₂, Ra(NO₃)₂, RaS와 같이 물에 잘 용해되는 형태일 때는 U에 비해 상대적으로 Ra이 결핍될 수 있는 것으로도 알려져 있다 (Ivanovich and Harmon, 1992). 연구지역에서 ²²⁶Ra과 ²²²Rn의 관계를 살펴보면, 지역별로는 두 방사능

원소간에 비례관계를 보여 일반적인 경향성은 나타나나 통계적으로는 유의하지 못한 수준이다 (Fig. 10). 이는 이미 언급된 ^{222}Rn 의 발산능력 및 토양의 함수율이라는 요인에 의해 공극속의 ^{222}Rn 농도가 영향을 받기 때문이라 판단된다. 그러나 토양의 ^{226}Ra 방사능이 4번 시료를 제외하고는 모든 시료에서 토양에서 ^{226}Ra 의 배경값보다 큰 1 pCi/g 이상을 보여 이들 시료의 채취지점에서 측정된 높은 ^{222}Rn 농도와는 방사능지구화학적 수반관계를 갖는다고 판단된다. 이상과 같이 토양에서 ^{238}U , ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra 의 지구화학적 특성차이에 의해 방사능평형이 교란을 받아 U과 Ra간의 분포차이가 발생할 수 있으므로 보다 광범위한 방사능원소의 분석을 통해 ^{238}U - ^{222}Rn , ^{226}Ra , ^{222}Rn 간의 관계를 체계적으로 규명할 필요가 있다고 생각된다.

결론

본 연구결과를 토대로 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

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

둘째, 지역별 토양가스 중 ^{222}Rn 농도의 차이는 지역의 지질을 구성하는 기반암의 종류에 기인하며 이는 기반암에 따른 U의 지구화학적 분포의 차이가 1차적 원인으로 작용했기 때문이라 판단된다.

셋째, 토양에서 라돈발산은 6~16 wt.%의 함수율구간까지는 함수율이 증가함에 따라 라돈발산이 증가하다가 6-16 wt.%의 함수율구간 이후로는 함수율의 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이는 토양입자 주위의 물이 recoil되는 Rn원자가 공극으로 이동하는 것을 도와주다가 공극수막을 형성하여 Rn의 확산길이를 감소시키는 것으로 설명할 수 있다. 또한 토양의 입도가 작아짐에 따라 라돈발산이 증가하는 경향이 나타났는데 이는 Rn의 발산능력이 Ra원자가 위치한 입자의 비표면적에 비례하는 이론과 일치한다고 판단된다.

네째, 토양시료의 방사능 분석결과, ^{238}U - ^{234}U 은 방사능 평형상태에 근접하였으나 ^{238}U - ^{226}Ra 은 ^{226}Ra 이 결핍되는 방사능 비평형상태를 보였다. 이는 토양의 지구화학적 환경에 따른 Ra의 거동차이로 해석되어 U의 분포만으로 토양가스중의 ^{222}Rn 을 예측하기에는 단점이 있다고 판단되며 차후 체계적인 U계열 방사능원소에 대한 분석의 필요

성을 시사하고 있다.

사 사

이 연구는 한국과학재단지정 전략광물자원연구센터 (CMR)의 연구비 지원에 의해 수행되었다.

참고문헌

- 구성분, 김상기, 최중호, 민성식, 박영수 (1981) 가평 및 울진 지역 우라늄광상조사연구. 동력 자원연구소. 113p.
- 김남강, 홍승호 (1975) 한국지질도 안양도폭. 국립지질광물연구소.
- 김동술, 김윤신, 김신도, 신용배, 김성천, 유정석 (1993) 서울시 지하철역내의 라돈 농도분포 및 저감대책. 한국대기보전학회지, v. 9, p. 271-277.
- 김옥준, 김서운, 유병화, 박명권 (1974) 한국지질도 가평도폭. 국립지질광물연구소.
- 김옥준, 이대성, 이하영 (1977) 한국지질도 보은도폭. 국립지질조사소.
- 이진수 (1997) 옥천대 흑색셰일 및 점판암 분포지역에서의 잠재적 독성원소들의 분산과 부화. 서울대학교 박사학위논문, 234p.
- 홍영국 (1997) 대전시 지역 라돈 환경지화학 연구. 자원환경지질, 30권, p. 51-60.
- Barretto, P.M.C. (1972) Physical characteristics of radon-222 emanation from rocks, soils and materials. In: The natural radiation environment II, National Technical Information Service, Springfield, p. 731-740.
- BPA (Bonneville Power Administration) (1989) Estimation of Radon Potential in the Pacific Northwest Using Geological Data. U.S. Geological Survey, Virginia, 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.
- 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.
- 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.
- Titayeva, N.A. (1994) Nuclear Geochemistry. CRC press, 296p.
- Wilson, C. (1987) Radon-geological aspects of environmental problem. The Amateur Geologist, v. 11, p. 17-33.