

부산시 금정구 일대 암석 및 토양에서 일부 환경방사성 핵종들의 분포 특성

이효민¹ · 문기훈¹ · 김진섭^{1,*} · 안정근² · 김현철³

¹부산대학교 지구환경시스템학부, ²부산대학교 물리학과, ³인하대학교 물리학과

Distribution of Some Environmental Radionuclides in Rocks and Soils of Guemjeong-Gu Area in Busan, Korea

Hyomin Lee¹, Ki-Hoon Moon¹, Jin-Seop Kim^{1,*}, Jung Keun Ahn², Hyun-Chul Kim³

¹Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 607-735, Korea

²Department of Physics, Pusan National University, Busan 607-735, Korea

³Department of Physics, Inha University, Incheon 402-751, Korea

요약: 부산 금정구일대의 암석, 토양 및 토양가스 내 주요 환경방사성 핵종들(⁴⁰K, ²²⁸Ac, ²²⁶Ra, ²²²Rn) 및 U의 분포 특성에 대하여 연구하였다. 연구지역의 화강암질 암석들에서 환경방사성 핵종들의 방사능은 ⁴⁰K>토륨붕괴계열>우라늄붕괴계열 순으로 낮게 나타나 화강암질 암석에서 U에 비해 Th이 상대적으로 많이 부화됨을 잘 나타내고 있다. 그러나 암석 내 U 농도 및 ²²⁶Ra and ²²⁸Ac 방사능은 암석의 분화단계를 잘 반영하지 못하고 있다. 잔류토양 내 환경방사성 이 핵종들의 방사능과 U의 농도는 모암에 비해 높게 나타나며, 토양가스, 토양 및 암석에서 환경방사성 핵종들의 분포는 낮은 정도의 상관관계를 보인다. 이러한 사실들은, 토양가스 및 토양에서 환경방사성 핵종들의 방사능은 모암에 의한 영향보다, 암석의 풍화작용과 토양형성작용 동안 이들 핵종들과 모핵종들의 용탈 및 흡착 등의 거동 특성에 의한 영향을 더 크게 받음을 시사한다.

주요어: 부산, 환경방사성 핵종, 방사능, 라돈, 라듐, 우라늄

Abstract: The distribution characteristics of some major environmental radionuclides (⁴⁰K, ²²⁸Ac, ²²⁶Ra, ²²²Rn) and U in rocks, soils and soil gas were studied at Geumjeong-Gu, Busan, Korea. The activities of radionuclides in granitic rocks are decreased in the order of ⁴⁰K>thorium decay series>uranium decay series. This reveals that Th was relatively more enriched in granitic rocks than U. The U content and activity of ²²⁶Ra and ²²⁸Ac, however, don't reflect the fractionation sequence of granitic rocks in the study area. The activities of all these radionuclides and U content in soils are generally higher than in rocks, and their distribution in rocks, soils and soil gas show very low co-relationship. These facts indicate that the activities of radionuclides in soil and soil gas were greatly affected by leaching and adsorption properties of the radionuclides and their parents during weathering and pedogenetic process rather than their concentrations in parent rocks.

Key words: Busan, activity, environmental radionuclide, ²²⁶Ra, ²²²Rn, uranium

서 론

환경방사성 핵종은 인공방사성 핵종과 천연방사성 핵종으로 구분할 수 있다. 인공방사성 핵종에는 ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs과 같은 반감기가 길고 인체에 유해한 방사성물질이 있으며, 천연방사성 핵종에는 지구상에 존재하는 긴

수명의 핵종으로 비 붕괴계열의 ⁴⁰K, ⁸⁷Rb, ¹⁴⁷Sm 등 11종이 알려져 있으며, 이들은 모두 10억 년 이상의 반감기를 가지고 있다. 붕괴계열로는 ²³⁸U(Uranium decay series), ²³²Th(Thorium decay series), ²³⁵U(Actinium decay series)가 있으며, 이 계열들은 α 선, β 선을 내서 붕괴하고, 최후에 안정한 납의 동위원소가 되는 것들

*Corresponding author: Tel. 82-51-510-2253, E-mail. jsekim@pusan.ac.kr

로서, 이것들이 붕괴하는 동안 모두 45종의 방사성 핵종이 나타난다. 이들 중 암석 및 토양에 널리 분포하여, 주요 관심의 대상이 되는 것이 ^{238}U , ^{232}Th 와 그 붕괴계열의 딸핵종과 K^{40} 이 있다. 특히, 라돈은 암석기원 자연방사성 원소로서 ^{238}U , ^{232}Th , ^{235}U 를 모핵종으로 각 계열로부터 암석, 토양, 지하수로부터 자연적으로 생성되는 기체 방사성핵종이다. 또한, 자연에 존재하는 가장 무거운 기체이며 무색, 무취, 무미한 특성으로 일상 생활에서 감지하기 어렵다. 지표면과 외부와의 공기흐름이 잘 안 되는 지하공간에서 우리의 호흡기를 통하여 폐에 침착된다. 라돈은 알파선과 베타선을 방출하며 마지막 붕괴단계인 납(Pb)으로 변하는 과정에서 폐에 영향을 미치기 때문에 흡연과 더불어 폐암의 중요한 요인으로 간주되고 있다. 이러한 이유로 미국 EPA에서는 1986년 ‘라돈에 대한 시민가이드’에서 라돈이 폐암을 유발할 수 있음을 경고하였으며, 실내공기 기준치를 4 pCi/L (0.15 Bq/L), 0.02 WL 이하로 규제하고, 토양가스 중 라돈의 농도가 $1,350\text{ pCi/L}$ 이상시 대책 마련이 필요하다고 밝혔다. 1 Ci ($=3.7 \times 10^{10}\text{ Bq}$)는 방사능의 강도 및 방사성물질의 양을 나타내는 단위로서 1초에 370억 개의 원자핵이 붕괴하여 방사능을 내는 방사성물질의 양에 해당하며, 공기 혹은 물속의 방사능 농도는 Ci/L 혹은 pCi/L 로 나타낸다. WL은 라돈에서 생긴 후대 핵종들이 방사선을 뿜어 낼 수 있는 잠재된 방사능의 크기를 나타내는 단위로서, 공기 1리터 중 100 pCi 인 라돈이 그의 후대 핵종들과 방사평형을 이룬다면, 후대 핵종들의 농도는 1 WL 로 정의한다

외국의 경우 환경방사능에 대한 다양한 연구들이 수행되어졌다. 암석 및 토양에서의 환경방사성 핵종들(^{238}U , ^{226}Ra , ^{222}Rn)의 지화학적 연구(Rose *et al.*, 1979; Gueniot *et al.*, 1988; Greeman, 1991)와 모핵종의 함량에 따른 토양가스 중의 ^{222}Rn 의 농도에 대한 연구들(Baixeras *et al.*, 2001)이 있다. ^{222}Rn 의 발산률에 대한 연구로 기반암의 종류(Abumurad and Al-Tamimi, 2001; Al-Shereideh *et al.*, 2006), 토양의 깊이(Kovach 1945; Abumurad and Al-Tamimi, 2001; Al-Shereideh *et al.*, 2006), 입자의 크기(Sakoda *et al.*, 2007), 기온 및 날씨(Kovach 1945; Iakovleva and Ryzhakova, 2003; Al-Shereideh *et al.*, 2006), 토양의 습도 및 온도(Kovach, 1945; Sun and Furbish, 1995; Iakovleva and Ryzhakova, 2003; Iskandar *et al.*, 2004; Garver and Baskaran, 2004; Barillon *et al.*, 2005), 지형의 구배(Ramola *et al.*, 2007), 시간에 따른 변화(Washington and Rose 1992; Winkler *et al.*, 2001)에

대한 연구가 실시되었다. 이 외에도 지하수(Ramola *et al.*, 2007; Sakoda *et al.*, 2007)와 실내공간(Bahtijari *et al.*, 2007; Gervino *et al.*, 2007)에서 라돈의 위해성에 관련된 많은 연구들이 수행되고 있다. 최근 국내에서도 지하공간에서 생활하는 시간이 늘어남에 따라 미세먼지 및 물리, 화학적인 공기오염기준에 대해서는 법적인 규제와 함께 국가적인 국민보건 차원에서 조사 관리가 이루어지고 있다. 그리고 생활공간으로 유입되는 환경방사능에 대한 관심과 우려가 점차 대두되고 있으며, 이에 대한 연구가 이루어지고 있다. 국내의 선행연구들을 살펴보면, 홍국영(1997)은 대전 지역의 암석, 토양, 토양가스, 지하수 등의 방사능을 조사하였으며, 제현국 외 (1998a)와 전효택(2000)은 기반암에 따른 토양 가스 내 ^{222}Rn 농도 분포에 관한 연구를 수행하였다. 제현국 외 (1998)는 서울대학교 관악캠퍼스 내의 40곳의 실내 라돈농도를 측정하고, 9곳이 EPA의 실내 라돈 기준치인 4 pCi/L 를 초과하는 것으로 보고하였으며, 홍영국 외 (1998)는 서울 지하철역 승강장 및 토양 내 유해라돈함량 연구를 통해 지하철역내의 라돈 함량과 그 지역의 암석 및 토양의 우라늄 함량은 직접적인 관계가 없다고 밝혔다. 홍영국과 홍세선(2002)은 국내 기반암의 자연방사성 원소 함량과 라돈의 위해성에 관하여 연구한바 있다. 이진용(2008)은 지하수내 우라늄, 라듐, 라돈의 발생과 저감 방법 등에 대한 연구에서 춘천시의 지하수내 라돈 농도가 기준치의 최고 16배 이상 초과한 곳도 나타난 곳도 있으며, 이에 대처하기 위해 라돈의 거동에 대한 체계적인 연구가 필요함을 언급했다. 과학기술부에서는 1997년~2005년까지 원자력중장기 연구개발 사업을 통하여 전국규모의 실내외 라돈 조사를 수행한바 있다.

부산지역에서도 라돈에 대한 연구가 아주 제한적으로 이루어졌다. 임민철(2004)은 부산 지역의 일반주택의 지하실에서 라돈의 농도가 계절에 따라 4 pCi/L 를 초과하는 지역이 있음을 보고하였고, 이효민 외 (2006)는 부산 지하철역 내의 라돈 함량과 주변 기반암의 라듐함량과 관련성을 조사한 바 있다. 이러한 선행연구들에서 부산지역이 환경방사능에 대해서 안전한 지역이 아니며, 곳에 따라 미국 EPA의 권고치를 초과하는 곳이 나타남에 따라 체계적인 라돈 및 환경방사능의 연구와 모니터링이 필요함이 지적되었다. 따라서 이번 연구에서는 부산 지역의 종합적 환경방사능 위해성 평가를 위한 기초 연구로, 부산 금정구일대의 암석, 토양 및 토양가스에서 주요 환경방사성 핵종들(^{40}K , ^{228}Ac , ^{226}Ra , ^{222}Rn)과 U의 분포 특성에 대하여 연구하였다.

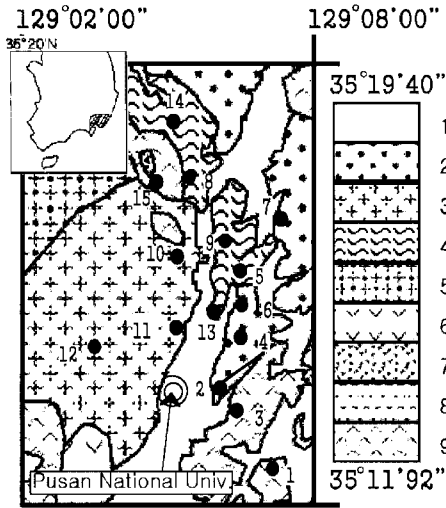


Fig. 1. Geological map and sample locations in study area (modified from Son *et al.*, 1978). 1: alluvium, 2: micrographic granite, 3: adamellite, 4: biotite granite, 5: hornblende granite, 6: granodiorite, 7: rhyolitic rock, 8: sedimentary rock, 9: andesitic rock.

금정구의 지질은 지질계통상 하위로부터 백악기 경상누층군에 속하는 유천층군 안산암질 화산암류, 백악기 말의 화강암류, 이들을 관입하고 있는 신생대 얽기성암맥 그리고 최후기 충적층으로 구분된다 (손치무 외, 1978; 손문의, 2002). 중생대 백악기 화강암류는 분화암상으로 분류되는 화강섬록암, 흑운모 화강암, 아다멜라이트와 미문상 화강암으로 구분된다. 흑운모 화강암은 노포동, 구서동 지역에 넓게 분포하며, 화강섬록암은 부곡동 일부 지역에 아주 소규모로만 나타나고 있다. 아다멜라이트는 동래단층을 포함하는 충적층을 중심으로 조사지역의 동편에 해당하는 금정산의 넓은 지역에 분포하며, 미문상화강암은 조사지역의 서편에 해당하는 선동, 오륜동, 부곡동의 넓은 지역에 걸쳐 분포되고 있다. 유천층군 안산암질 화산암류는 노포동일대와 서동지역에 분포하는데 주로 암회색 내지 암녹색 계통의 치밀 견고한 조립질의 암석으로, 암편질 응회암이 대부분을 차지하며 부분적으로 용암류와 응회질 퇴적암이 협재된다. 이들 암석은 백악기 화강암류 속하는 화강암들에 의하여 불규칙하게 관입당하고 있다.

연구지역의 지질

본 연구지역의 위치는 N 35°10'00"~35°20'00", E 129°00'00"~129°15'08"인 부산광역시 금정구를 대상으로 하였고, 지질학적으로 경상분지의 남동부에 속하는 연구지역은 유천층군과 불국사 관입암류가 주를 이루고 있다. 다대포, 송도 일원에 국소적으로 퇴적암이 분포하기도 한다. 이러한 층들은 김인수(1988)에 의하여 하양층군 하부에 속하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 1:250,000 부산지질도폭(김동학 외, 1998), 1:50,000의 부산가덕 도폭(장태우 외, 1983), 동래월내 도폭, 김해도폭 (손치무 외, 1978)이 사용되었다. 금정구는 부산시에서 가장 험준한 산세를 보이고 있는 곳 중 하나인 금정산의 정상부인 금정봉고지(최대 801 m)가 조사지역의 서편에 위치하고 있으며, 이를 중심으로 남북 방향으로 산악 지형을 형성하고 있다. 금정산의 동과 서편에는 각각 동래 단층과 양산 단층이 위치하며, 이곳을 따라 침식 활동이 활발하여, 부산시 일원 주요 하천인 온천천과 낙동강이 형성되어 있다. 충적층은 주로 동래단층과 양산단층을 따라 두껍게 발달하고 있으며, 충적층 지역이 금정구의 저지대 지역으로 주거시설이 밀집되어 있으며, 도로 등의 주요 기간시설물들이 위치하고 있다. 조사지역의 동편은 다갈산(104 m), 부영산(175 m), 구월산(317 m) 등 비교적 낮은 노년기 산들이 위치하고 있다.

연구 방법

시료채취

암석 및 토양의 주요 환경방사성핵종들과 토양가스 내 라돈의 방사능과의 상관관계를 정밀 분석하기 위하여 금정구 지역의 15개소에서 암석(35개) 및 토양 시료(35개)를 채취 분석하였다. 1차로 12개소에서 대략적 상관관계를 파악한 후, 암석의 풍화 상태와 지질 특성을 고려한 정밀조사를 실시하고, 2차 15개소에서 추가로 암석 및 토양시료를 채취하여 분석함으로써 측정오차를 최소화하여 명확한 상관관계를 찾고자 하였다. 암석시료채취는 1:50,000 지질도를 기준하여 모든 종류의 암석을 포함하도록 하고, 토양단면이 잘 발달하여 토양 단면관찰, 토양시료 채취 및 라돈 측정이 용이한 지점을 선정 수행하였다. 토양시료 채취는 토양단면이 노출된 곳에서 토양 단면을 분석하여 기반암으로부터 풍화되어 기반암의 특성이 잘 반영되는 곳에서 이루어졌으며, O층이 배제되고 같은 토양층(A1층)으로 분류되는 단면의 60±5 cm 깊이에서 채취하도록 하였다.

암석 및 토양의 환경방사능 측정

암석 및 토양 시료의 환경방사성 핵종(⁴⁰K, ²²⁸Ac, ²²⁶Ra, ²²²Rn)을 부산대학교 핵물리방사선기술연구소에서 고순도 저마늄 검출기(HPGe, High purity germanium detector)를 이용하여 측정하였으며, 우라늄은 한

국기초과학 지원연구원 부산센터에서 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Inductively coupled plasma-mass spectrometer)로 분석하였다.

야외에서 채취해온 암석은 분쇄하여 마리넬리(Marinelli) 비이커에 담은 후 라돈가스가 새어 나가지 않도록 에폭시로 완전 밀봉하였다. 암석의 분쇄는 조크리셔를 사용하여 분쇄하였다. 본 연구에서는 분쇄된 암석과 채취된 토양은 체질하여 1.19 mm 이하의 입자만을 대상으로 분석하도록 하였다. 암석의 분쇄과정에서 오염이 일어나지 않도록 주의의를 기울였으며, 밀봉을 한 후 검출기로 방사능 측정에 앞서 항온항습이 잘 되는 곳에 30일 이상을 보관하여 방사평형을 이루도록 하였다. 연구에서 사용된 고순도 저마늄 검출기는 1.33 MeV에서 1.95 keV의 분해능을 가지고, 상대효율 30%, 피크 대 컴프턴 비는 55:1의 특성을 가지고 있다. 검출기의 인가전압은 3000 V이고 8000초 동안 측정하였다. 효율교정은 표준과학연구원서 제공한 감마선 교정선원을 이용하였다

^{226}Ra 은 광자 방출율이 3.3%인 186.2 keV에서 감마선을 방출하며 이 감마선은 ^{235}U 에 의해 방출되는 185.7 keV의 감마선과 중첩이 일어날 수 있다. ^{226}Ra 의 186.2 keV 감마선과 ^{235}U 의 185.7 keV 감마선 사이의 두 피크는 단지 0.5 keV 차이므로 비록 분해능이 우수한 검출기라 하여도 분리할 수 없다. 또한, ^{235}U 의 143.8 keV에 위치한 감마선은 그 자신의 붕괴계열에 속해있는 ^{226}Ra 의 144.3 keV에 위치한 감마선과 중첩된다. 따라서 ^{226}Ra 의 직접 측정은 ^{235}U 이 없는 경우에 한하여 186.2 keV에서 측정할 수 있다(성정욱, 2001). 우라늄에 의해 ^{226}Ra 의 직접 측정이 어려우므로 본 연구에서는 ^{226}Ra 딸핵종을 이용한 간접측정을 실시했다. ^{214}Bi 의 609 keV 감마선은 피크에 영향을 주는 방사성 동위원소의 감마선이 없기 때문에 구별하는데 용이하다. 그리고 45%의 매우 높은 광자 방출율을 가진다. 따라서 암석과 토양의 ^{226}Ra 의 방사능 분석은 ^{214}Bi 의 609 keV 감마선을 이용하여 분석하였다.

토양 가스 내 라돈 농도 측정

토양가스 내 라돈(^{222}Rn)의 측정은 휴대용 라돈 측정기(Pyron AB-5 portable radiation monitor)와 alpha sensitive scintillation cell(Lucas cell 300A), vacuum soil probe를 이용한 in-situ 측정방식을 채택하였다. ^{222}Rn 는 기체상의 방사성 핵종으로 α 붕괴(반감기 3.82 일)를 한다. 이때 발생한 α 입자가 은과 아연 황화물이 도포 되어져 있는 scintillation cell의 내벽에 부딪히면 광자가 발생하게 되고 AB-5의 내부 센서가 이를 감지

해 측정하는 방식이다. 현장 측정은 토양 시료를 채취한 곳에서 즉시 실시하였으며, 토양 심도 60 cm 지점까지 지름 1.5 cm의 구멍을 낸 후 Soil Probe를 삽입하고, 진공펌프를 이용해 라돈가스(237.5 ml)를 Lucas cell에 포집하여 12분간 2회 반복 측정하였으며, 제조사에서 제공한 보정치를 사용 ^{222}Rn 농도를 계산하였다. 이후 본 논문에서 라돈은 ^{222}Rn 을 지칭한다.

결 과

암석의 환경방사성 핵종 분포

고순도 저마늄 검출기에 의해 분석된 암석의 환경방사성 핵종들의 방사능은 Table 1에, ICP-MS에 의한 암석 내 U의 측정지점 별 평균농도를 Table 2에 나타내었다. ^{40}K 은 비 붕괴계열, ^{226}Ra 은 우라늄붕괴계열, ^{228}Ac 은 토륨붕괴계열에 속하며, 전반적으로 $^{40}\text{K} >$ 토륨붕괴계열 $>$ 우라늄붕괴계열 순으로 암석 내 방사능이 낮게 나타났다. 특히, 연구지역 화강암질 암석 내에서 토륨붕괴계열의 ^{228}Ac 이 우라늄붕괴계열의 ^{226}Ra 의 방사능에 비해 전반적으로 높게 나타나는 것은 화강암 내에서 U에 비해 Th가 상대적으로 많이 부화됨을 반영한다. Faure and Mensing (2004)에 의하면, 화강암질 마그마의 결정화작용 마지막 단계에서 우라닐(Uranyl)이온으로 용탈된 결과 Th이 U에 비해 상대적으로 많이 화강암질 암석에 부화된다 한다.

연구지역의 화강암질 암석들 내 ^{226}Ra 의 전체 평균 방사능은 $38.14 \pm 5.19 \text{ Bq/kg}$ 이며, U의 전체 평균 농도는 $2.68 \pm 0.51 \text{ ppm}$ 으로 나타났다. ^{226}Ra 는 화강암질암에서 암석의 종류와 관계없이 거의 유사한 값을 보이지만, U의 경우 화강섬록암 > 아다멜라이트 > 미문상화강암 > 흑운모화강암 순으로 낮게 나타난다. 연구지역 안산암의 ^{226}Ra 과 U은 각각 $36.35 \pm 14.45 \text{ Bq/kg}$ 과 $2.50 \pm 1.47 \text{ ppm}$ 으로 나타났으나, 지역에 따라 편차가 크게 나타났다. 토륨붕괴계열의 ^{228}Ac 의 경우, 화강암질 암석의 전체 평균 방사능은 $87.00 \pm 21.74 \text{ Bq/kg}$ 로 안산암의 전체 평균 방사능 $75.80 \pm 30.89 \text{ Bq/kg}$ 보다 높게 나타났다. 화강암질 암석의 종류에 따라 전반적 화강섬록암 > 흑운모화강암 > 미문상화강암 > 아다멜라이트의 순으로 높게 나타났으며, 우라늄붕괴계열의 ^{226}Ra 방사능에 의한 순서와는 다르게 나타났다.

일반적으로, 환경방사능의 근원이 되는 우라늄과 토륨은 부분용융과 마그마의 분별결정작용 시 액상의 잔류마그마로 선택적으로 농집되는 경향을 보임으로, 상대적으로 Si 함량이 높은 암석에 더욱 많은 양이 부화된다(Faure and Mensing, 2004). 따라서 결정질 암석의

Table 1. Activities of radionuclides in rock samples measured by using HPGe (in Bq/kg).

Rock type	Site No.	Non-decay series			Thorium series			Uranium series			
		⁴⁰ K	Avg.	Total Avg.	²²⁸ Ac	Avg.	Total Avg.	²²⁶ Ra	Avg.	Total Avg.	
An	K-1	1	534.40			73.60			36.10		
		2	959.00	748.80		117.50	82.20		64.60	48.50	
		3	753.00	±212.33		55.50	±31.88		44.80	±14.61	
	K-8	1	842.50			73.90			31.90		
		2	275.00	525.30	536.28	45.80	63.37	75.80	29.20	31.17	36.35
		3	458.40	±289.60	±295.60	70.40	±15.31	±30.89	32.40	±1.72	±14.45
	K-3	1	121.10			25.20			12.60		
		2	212.50	166.80		58.10	39.83		27.50	24.00	
		3	-	±305.11		36.20	±14.27		31.90	±8.34	
k-15		704.20	704.20		117.80	117.80		52.50	52.50		
GD	K-2	1	1290.00			119.00			41.70		
		2	1161.80	1219.27	1219.27	115.00	103.07	103.07	35.50	37.80	37.80
		3	1206.00	±64.63	±64.63	75.20	±16.75	±24.22	36.20	±10.11	±3.40
BG	K-5	1	996.10			91.10			26.40		
		2	1158.80	1064.63		105.00	84.10		45.10	33.57	
		3	1039.00	±44.50		56.20	±24.39		29.20	±3.55	
	K-9	1	1055.00		858.77	100.20		85.45	40.00		37.58
		2	990.60	1040.53	±192.32	108.00	90.20	±20.87	44.90	40.97	±7.38
		3	1076.00	±121.63		62.40	±24.74		38.00	±4.39	
K-13		579.90	579.90		99.90	99.90		43.80	43.80		
K-14		750.00	750.00		67.60	67.60		32.00	32.00		
AD	K-10	1	988.90	1013.95		90.70	75.60		38.40		
		3	1039.00	±35.43		60.50	±21.35		37.00	37.70	
	K-11	1	1063.00		1049.04	104.70		81.68	42.30		38.29
		2	1130.50	1108.17	±57.78	111.00	95.00	±23.62	44.60	42.97	±4.17
		3	1131.00	±154.44		69.30	±17.58		42.00	±4.72	
	K-12	1	-			98.90	74.45		35.40		
2		1025.00	1025.00		50.00	±34.58		33.00	34.20		
GG	K-4	1	1007.90	1007.45		105.00	81.00		37.80	36.20	
		2	1007.00	±0.64		57.00	±33.94		34.60	36.20	
	K-6	1	1230.40		1063.69	110.00		85.00	45.20		38.03
		2	987.20	1113.53	±81.11	99.60	89.83	±22.26	41.90	41.80	±5.75
		3	1123.00	±35.56		59.90	±21.94		38.30	±4.69	
	K-7	1	1076.70			99.20			41.60		
		2	1029.60	1070.10		90.40	84.17		30.20	36.10	
3	1104.00	±103.99		62.90	±20.70		36.50	±1.18			

An: andesitic rock, GD: granodiorite, BG: biotite granite, AD: adamellite, GG: micrographic granite.

경우, 마그마 분화에 따라 분화 후기의 암석으로 갈수록 그 함량이 증가하며, 염기성 암석에는 거의 없으며, 화강암의 경우 2~12 ppm의 우라늄과 8~33 ppm의 토륨을 함유한다고 한다고 알려져 있다(Greeman, 1991). Faure and Mensing(2004)에 의하면, 대륙지각 내에서 현무암 0.43 ppm, 반력암 0.84 ppm, 안산암 2.4 ppm,

화강암류의 암석에서는 4.80 ppm의 평균 우라늄 함량을 나타낸다 한다. 국내 연구(홍영국과 홍세선, 2002)에 의하면, 백악기 화산암류와 화강암의 경우, 우라늄 평균 함량이 각기 3.21±1.43 ppm과 4.18±2.31 ppm으로 화강암에서 약간 높게 나타나는 것으로 보고하였다. 그러나 연구지역의 안산암과 화강암질 암석에 대한 U 및

Table 2. Site average values of ^{222}Rn , ^{226}Ra and U in study area.

Rock type	Site	Soil gas (Rn)	Soil (Ra)	Rock (Ra)	Soil (U)	Rock (U)
		(pCi/L)	HPGe (Bq/kg)		ICP (ppm)	
An	K-1	349.50	47.94	48.50	4.44	3.60
	K-8	310.50	43.40	31.17	3.87	3.07
	K-3	150.00	35.07	24.00	3.82	0.82
GD	K-2	420.00	39.43	37.80	3.00	3.25
BG	K-9	324.00	58.25	40.97	4.28	2.30
	K-13	336.00	40.60	43.80	3.27	3.05
	K-5	358.50	45.17	33.57	3.07	1.94
AD	K-12	486.00	49.10	34.20	4.92	2.75
	K-11	553.50	61.10	42.97	4.86	2.50
	K-10	541.50	42.20	37.70	3.56	3.23
GG	K-4	388.50	55.85	36.20	3.76	2.01
	K-7	402.00	49.65	36.10	3.40	3.07

An: andesitic rock, GD: granodiorite, BG: biotite granite, AD: adamellite, GG: micrographic granite.

^{226}Ra 와 토륨붕괴계열의 ^{228}Ac 을 비교 분석 해보면, U와 ^{228}Ac 에서만 화강암이 약간 높은 방사능 평균치를 보인다 할 수 있으나, 표준편차 이하의 미미한 차이를 나타내어 분화단계에 의한 차이를 확연히 나타내지 않는다. 화강암질 암석들의 비교에서도, 화강섬록암→흑운모화강암→아다멜라이트→미문상화강암의 분화단계에 따른 차이를 전혀 반영하지 못하고 있다. 특히, 연구지역의 화강암질 암석들(2.68 ± 0.51 ppm)과 안산암(2.50 ± 1.47 ppm)의 U 평균농도는 홍영국과 홍세선(2002)에 의한 백악기 화강암 (4.18 ± 2.31 ppm) 및 화산암 (3.21 ± 1.34 ppm)과 비교해서 약간 낮은 값을 보인다. 연구지역의 중생대 안산암의 환경방사성 핵종들의 방사능이 화강암질 암석들과 큰 차이를 보이지 않는 것은 후기의 화강암질 암석들의 관입에 의한 영향으로 생각할 수 있으며, 화강암질 암석들에서는 암석의 풍화과정과 정도에 따른 이들 환경방사능의 거동 및 분포 특성이 다르기 때문에 암석의 분화단계가 잘 반영되지 못한 것으로 생각된다.

^{40}K 의 경우, 화강암질암석 전체 방사능 평균값(1049.00 ± 143.13 Bq/kg)이 안산암(536.28 ± 295.60 Bq/kg)에서 보다 높게 나타나는 것은 이들 암석의 화학조성과 광물 조성의 특성을 대체로 잘 반영하는 것이라 할 수 있다.

토양의 환경방사성 핵종 분포

고순도 저마늄 검출기에 의해 분석된 토양의 환경방사성 핵종들의 방사능은 Table 3에, ICP-MS에 의한 토양 내 U의 각 측정지점에서 평균농도는 Table 2에 나

타내었다. 전체적 평균량은 ^{40}K >토륨붕괴계열>우라늄 붕괴계열 순으로 낮아지는 암석에서와 같은 경향을 유지하고 있다.

연구지역의 화강암질 암석을 모암으로 하는 잔류토양 내 ^{226}Ra 의 평균 방사능은 48.89 ± 9.42 Bq/kg이며 U의 평균 함량은 3.79 ± 0.71 ppm으로 나타났다. 화강암질 암석의 종류에 따라 토양 내 ^{226}Ra 는 아다멜라이트>미문상화강암>흑운모화강암>화강섬록암의 순으로 낮게 나타났으며, U의 경우 아다멜라이트>흑운모화강암>미문상화강암>화강섬록암 순으로 낮게 나타났다. 이러한 불일치는 토양 내 ^{226}Ra 의 방사능은 U의 함량과 상관관계가 적음을 지시한다. 안산암의 ^{226}Ra 평균 방사능은 42.58 ± 13.20 Bq/kg, U 평균 농도는 4.04 ± 0.34 ppm으로 화강암류의 암석을 모암으로 하는 토양과 비교하면 ^{226}Ra 는 낮고 U는 조금 높은 수치를 보인다. 토륨붕괴계열의 ^{228}Ac 의 경우, 화강암질 암석을 모암으로 하는 토양의 전체 평균값은 109.77 ± 41.75 Bq/kg로 안산암의 전체 평균값 92.16 ± 34.12 Bq/kg보다 높게 나타났다. 토양에서 ^{226}Ra 은 화강섬록암이 상대적으로 낮게 나타나나, 그 외 화강암질 암석을 모암으로 하는 토양에서는 거의 비슷한 방사능을 나타낸다. 이상에서 나타냈듯이, 환경방사성 핵종들의 평균 방사능은 화강암질 암석을 모암으로 하는 토양에서 안산암을 모암으로 하는 토양에서 보다 높게 나타나며, 화강암지역의 토양만을 비교할 때 분화단계에서 전기에 해당하는 섬록암을 모암으로 하는 토양에서 뚜렷하게 낮은 농도를 보이거나, 그 외 화강암들을 모암으로 하는 토양에서는

Table 3. Activities of radionuclides in soil samples measured by using HPGe (in Bq/kg).

Rock type	Site No.	Non-decay series			Thorium series			Uranium series				
		⁴⁰ K	Avg.	Total Avg.	²²⁸ Ac	Avg.	Total Avg.	²²⁶ Ra	Avg.	Total Avg.		
An	K-1	1a	711.30			138.60			59.30			
		1b	583.80			128.60			61.60			
		2a	490.70	601.32		62.10	94.38		28.80	47.94		
		2b	526.80	±98.47		59.90	±37.06		26.50	±18.60		
		3	694.00			82.70			63.50			
	K-8	1	316.80	479.40	601.30	121.00	88.65	92.16	43.30	43.40	42.58	
		2	642.00	±229.95	±122.55	56.30	±45.75	±34.12	43.50	43.40	±13.20	
		K-3	1	583.40			97.80			33.20		
			2	640.60	634.33		82.20	76.10		34.60	35.07	
			3	679.00	±48.11		48.30	±25.31		37.40	±2.14	
K-15	745.90	745.90		136.30	136.30		36.70	36.70				
GD	K-2	1	620.10			116.10			36.50			
		2	572.60	564.23	564.23	-	81.80	81.80	43.40	39.43	39.43	
		3	500.00	±60.49	±60.49	47.50	±48.51	±48.51	38.40	±3.56	±3.56	
BG	K-5	1	660.60			97.60			34.20			
		2	793.40	719.67		144.60	100.90		57.30	45.17		
		3	705.00	±67.60		60.50	±42.15		44.00			
	K-9	2	<15.97		828.10	136.60	121.80	111.76	52.80	58.25	47.04	
		3	1066.00	1066.00	±192.68	107.00	±20.93	±28.95	63.70	±7.71	±11.09	
	k-13	1072.80	1072.80		132.20	132.20		40.60	40.60			
k-14	670.80	670.80		103.80	103.80		36.70	36.70				
AD	K-10	1	709.70			134.60	81.07		34.20			
		2	918.00	839.57		58.00	81.07		46.60	42.20		
		3	891.00	±113.28		50.60	±46.51		45.80	±6.94		
	K-11	1	1162.00		947.39	183.20		111.83	54.70		51.01	
		2	1026.30	1107.10	±153.02	152.10	142.30	±54.27	67.60	61.10	±10.67	
		3	1133.00	±71.46		91.60	±46.58		61.00	±6.45		
K-12	1	917.10	869.55		168.50	112.25		55.10	49.10			
	2	822.00	±67.25		56.00	±79.55		43.10	±8.49			
GG	K-4	1	990.40	844.70		134.30	96.20		55.50			
		2	699.00	±206.05		58.10	±53.88		56.20	55.85		
	K-6	1	378.50		771.29	111.80		112.12	43.80		50.44	
		2	950.90	737.13	±181.20	166.40	115.03	±38.62	59.00	51.83	±7.35	
		3	882.00	±312.49		66.90	±49.83		52.70	±7.64		
	K-7	1	726.00	826.55		155.30	128.25		49.10			
		2	927.10	±142.20		101.20	±38.25		50.20	49.65		

An: andesitic rock, GD: granodiorite, BG: biotite granite, AD: adamellite, GG: micrographic granite.

거의 유사한 평균농도를 나타낸다 할 수 있다.

토양 내 우라늄 농도 및 우라늄과 토륨붕괴계열의 환경방사성 핵종들의 방사능은 그 토양의 모암의 종류에 관계없이 암석에서 보다 전체적으로 높게 나타난다 (Table 1, 2, 3). 이는 이들 핵종을 포함하는 광물들의 풍화 저항성이 상대적으로 커서 토양 내 이들 광물의

상대적 집적이 일어나거나, 암석의 풍화작용과 토양형성작용 동안 암석으로부터 용탈된 우라늄, 토륨, 라듐은 토양 입자 표면에 강하게 흡착되거나, 철산화물(Fe-oxide), 점토광물 및 유기물에 의해 선택적으로 흡착되어 부화되기 때문이다. 따라서 각 방사성 원소의 토양 내 구성요소들에 선택적 흡착되는 정도는 달리하여, 암

석이 풍화되는 과정에서 토양에 27배까지 부화될 수 있는 것으로 보고되고 있다(Greeman, 1991).

⁴⁰K의 방사능은 대체로 암석에 비해 토양에서 낮게 나타나는데, 이는 풍화작용과 토양형성작용 시 정장석, 흑운모 및 각섬석과 같은 K-함유광물들의 풍화에 의한 K의 용탈이 활발히 일어남을 잘 시사하고 있다.

토양 가스

모암을 달리하는 토양가스 내 라돈(²²²Rn)농도는 Table 2에 나타난다. 안산암 지역의 토양가스 내 라돈의 방사능은 150.00~349.50 pCi/L (5.55~12.93 Bq/L), 평균 270.00±105.74 pCi/L (9.99±3.91 Bq/L)로서 화강암지역의 324.00~553.50 pCi/L (11.99~20.48 Bq/L), 평균 423.33±85.30 pCi/L (15.66±3.16 Bq/L)보다 상대적으로 낮게 나타난다. 화강암지역의 토양에서는 아다멜라이트>미문상화강암>화강섬록암>흑운모화강암 지역 순으로 라돈의 평균 농도가 높게 나타났다. 연구지역의 60 cm 깊이에서 토양 가스 내 라돈 농도는 미국 EPA기준인 1350 pCi/L (49.95 Bq/L)를 초과하는 지역은 나타나지 않는 것으로 나타났다.

종합토의

암석의 풍화에 따른 환경방사성 핵종들의 분포 및 거동 특성 분석을 위해 연구지역의 암석과 잔류토양에서의 측정된 환경방사성핵종들의 방사능 농도에서의 상관관계를 구하여 Fig. 2에 나타내었다. 상관계수 R² 값은 낮으나, 모든 핵종들이 정의 상관관계를 보이고 있다. 우라늄붕괴계열의 ²²⁶Ra에 비해 토륨붕괴계열의 ²²⁸Ac이 가장 높은 상관관계를 보이며, ⁴⁰K이 가장 낮은 상관관계를 보이고 있다. 토륨붕괴계열에 비해 우라늄붕괴계열의 상관관계가 낮게 나오는 것은 암석의 풍화과정동안 모핵종인 U과 Th의 거동 특성의 차이에서 기인된 것으로 생각된다. 즉, U과 Th는 광물 중에 4가 이온(U⁴⁺=1.05, Th⁴⁺=1.10)으로 존재하며, 두 원소의 동형치환이 활발하게 일어날 수 있다. 그러나 산화 환경에서는 우라늄의 경우, U⁶⁺로 산화되어 우라닐(Uranyl, UO₂²⁺) 복합이온을 형성하여 물에 쉽게 용해되는 특성을 나타낸다. 따라서 우라늄은 토륨과 분리되어 암석으로 부터 쉽게 제거되는 반면, Th는 산화되지 않고 상대적으로 용해도가 낮은 4가의 이온상태를 유지하여 암석으로부터 쉽게 제거되지 않고 잔류하는 특성을 지니고 있다(Rose et al., 1979; Faure and Mensing, 2004). 또한, 이들 핵종들의 암석과 잔류토양 내 방사능의 상관관계가 대체적으로 낮게 나오는 것

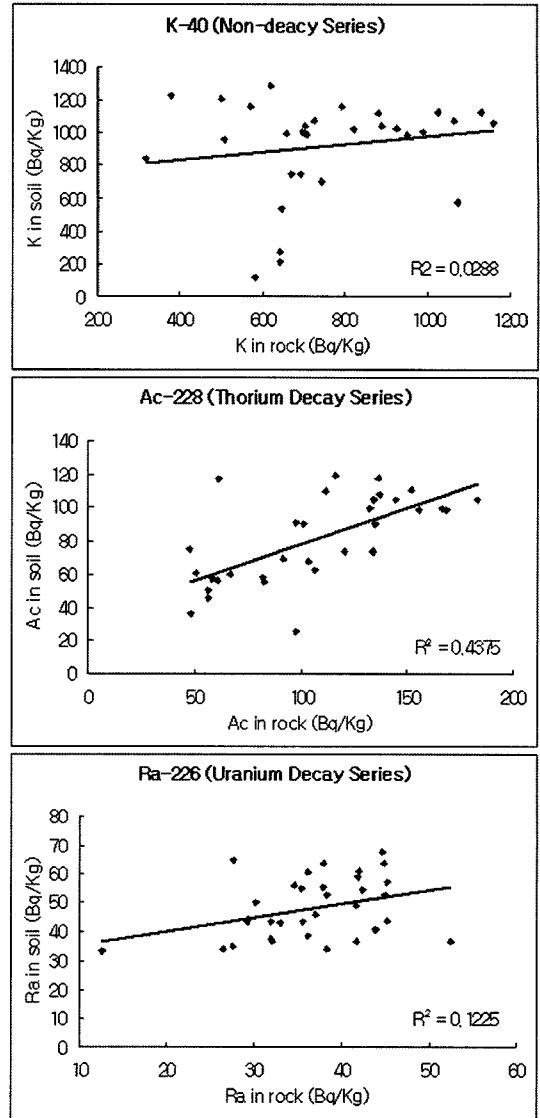


Fig. 2. Diagrams showing the co-relationships of various radionuclides in soils and rocks.

은, 암석의 풍화작용과 토양형성작용 동안 이들 핵종들의 암석에서의 용탈 특성이 다르며, 생성되는 토양의 철산화물(Fe-oxide), 점토광물 및 유기물과 같은 구성성분이 다르고 이들 성분에서의 선택적 흡착 특성이 다르기 때문이다(Rose et al., 1979; Gueniot et al., 1988; Greeman, 1991).

금정구 12개소 대표적 지역의 토양 심도 60 cm에서 추출된 토양가스 내의 ²²²Rn과 토양 및 암석의 ²²⁶Ra 평균 방사능과의 상관관계를 Fig. 3에 나타내었다. 전반

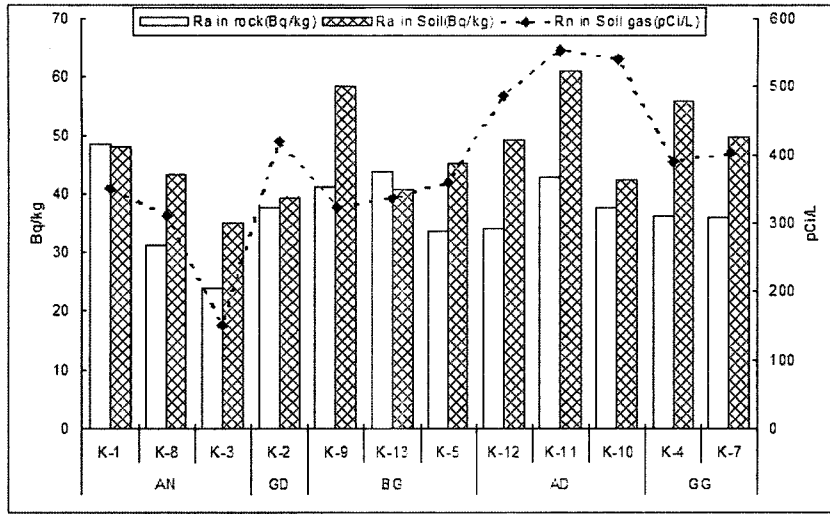


Fig. 3. Diagram showing activity variation of ^{226}Ra in soils and rocks and ^{222}Rn in soil gas. An: andesitic rock, GD: granodiorite, BG: biotite granite, AD: adamellite, GG: micrographic granite.

적으로 화강암질 암석에서 유래된 토양이 안산암지역의 토양에서 보다 토양가스 내 ^{222}Rn 방사능이 높은 경향을 보인다. 그리고 같은 종류의 암석에서 유래된 토양의 경우, 대체적으로 토양 내 ^{226}Ra 함량이 높은 경우 토양가스 내의 ^{222}Rn 의 함량이 높아지는 경향을 보이고 있으나, 일부 지역의 토양에서는 이러한 상관관계가 잘 나타나지 않고 있다. 이들 지역에서 토양 및 암석에서 ^{222}Rn , ^{226}Ra 방사능과 U의 함량과의 상관관계를 Fig. 4에 나타내었다. 토양가스 내 ^{222}Rn 의 방사능은 토양 및 암석의 ^{226}Ra 방사능과 낮은 정의 상관관계 보인다. 그리고 암석에서 ^{226}Ra 방사능과 U의 함량과의 상관관계는 토양에서 보다 높게 나타나며, 토양 내 우라늄 농도는 암석의 우라늄 농도와 거의 상관관계를 나타내지 않고 있다. 이러한 결과는 암석의 풍화작용과 토양형성작용 동안 암석 및 토양에서 우라늄이 쉽게 용탈되어, 토양 내 라듐 방사능을 잘 반영하지 않음을 보여준다. 제현국의 (1998a)와 전효택(2000)에 의하면, 우라늄과 라듐의 지구화학적 특성차이에 의해 방사능 평형이 교란 받아 분포차이가 발생한다고 하였다. 이상의 결과를 종합해보면, 암석의 풍화작용과 토양형성작용에 따라 같은 종류의 암석에서 유래된 잔류 토양에서의 라듐의 방사능이 달라질 수 있으며, 토양가스 내 라돈의 방사능은 토양의 발달 상태, 측정 당시의 토양의 온도와 습도 및 지형적 영향에 의해 달라질 수 있음을 시사한다. 따라서 지질특성에 따른 환경 방사능에 대한 위해성을 판단 할 경우, 암석의 풍화와

토양 특성에 따른 방사성 핵종의 거동 특성에 대한 자세한 파악이 선행되어야 할 것이다.

전술한 바와 같이, 연구지역의 안산암 및 화강암질 암석과 토양에서 환경방사성 핵종들의 방사능은 토륨 붕괴계열의 ^{228}Ac 가 우라늄붕괴계열의 ^{226}Ra 보다 높게 나타난다. 이는 결정화단계에서 화강암 내에서 U에 비해 Th가 상대적으로 많이 부화될 뿐 아니라(Faure and Mensing, 2004), 암석과 토양에서 Th에 비해 U의 용탈이 쉽게 됨(Rose *et al.*, 1979; Faure and Mensing, 2004) 잘 지시하는 것이다. 그러나 연구지역의 안산암과 화강암질 암석에서 환경방사성 핵종들의 방사능으로 암석의 분화단계에 의한 차이를 확연히 반영하지 못하였다. 연구지역의 중생대 안산암의 환경방사성 핵종들의 농도가 화강암질 암석들과 큰 차이를 보이지 않는 것은 후기의 화강암질 암석들의 관입에 의한 영향으로도 생각 할 수 있으며, 암석의 풍화도와 과정에 따른 이들 환경방사성 핵종들의 거동 및 분포 특성이 다르기 때문에 암석의 분화단계가 잘 반영되지 못한 것은 생각된다. 따라서 암석의 분화에 따른 환경방사성 핵종들의 방사능의 변화 분석을 위해서는 암석의 풍화에 대한 영향을 최대한 배제해야 할 것이다.

결론

1. 연구지역의 암석들에서 환경방사성 핵종들의 방사능은 전반적으로 ^{40}K >토륨붕괴계열>우라늄붕괴계열

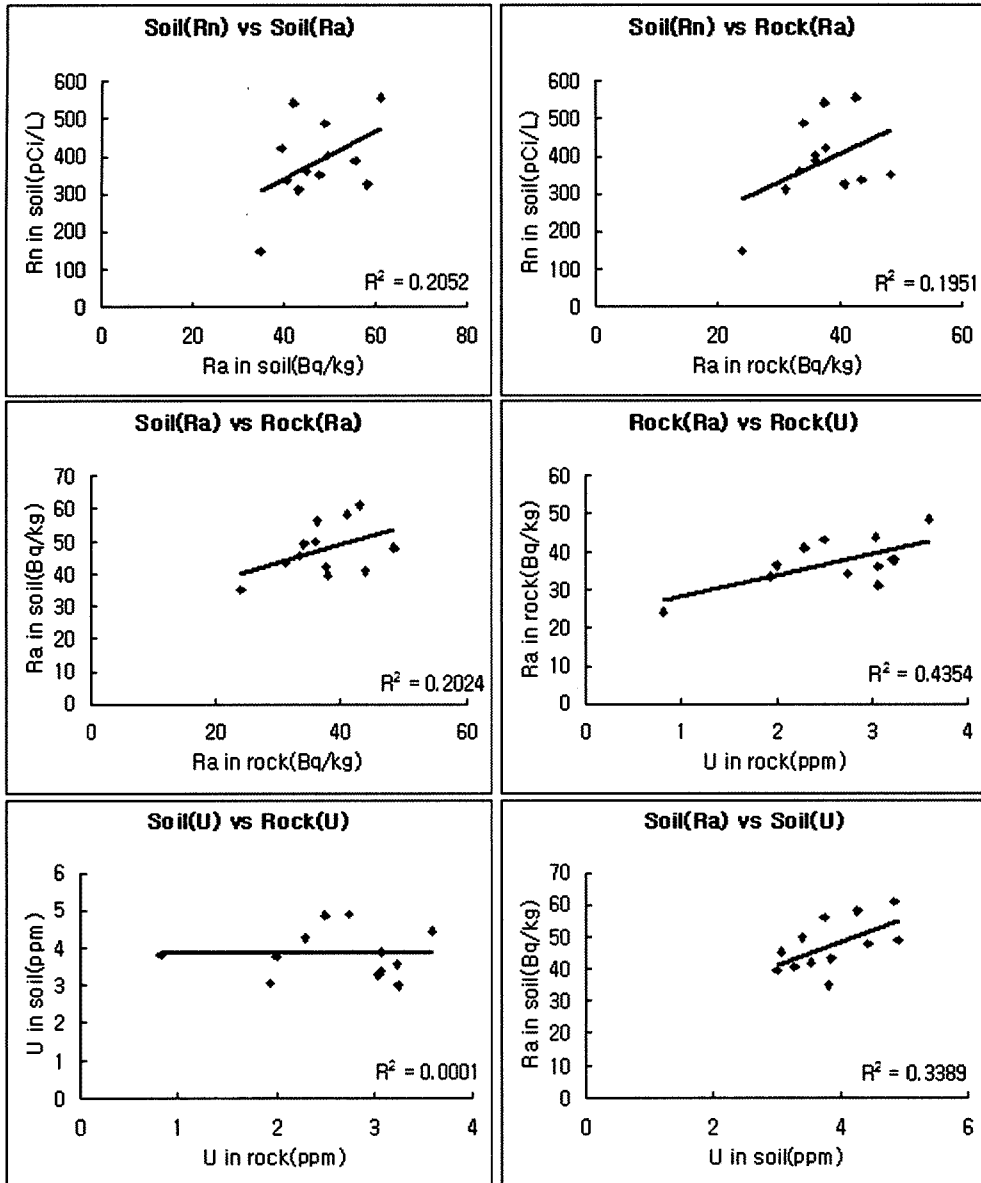


Fig. 4. Diagrams showing the co-relationships among ²²²Rn in soil gas, ²²⁶Ra and U in soils and rocks.

순으로 낮게 나타났으며, 특히, 화강암질 암석 내에서 토륨붕괴계열의 ²²⁸Ac이 우라늄붕괴계열의 ²²⁶Ra의 농도보다 전반적으로 높게 나타나는 것은 화강암 내에 U에 비해 Th가 상대적으로 많이 부화됨을 잘 반영하는 것이다.

2. 연구지역의 중생대 안산암의 U 및 우라늄과 토륨붕괴계열의 환경방사핵종들의 방사능이 화강암질 암석들과 큰 차이를 보이지 않는 것은 후기의 화강암질 암

석들의 관입에 의한 영향으로 생각 할 수 있으며, 화강암질 암석들에서는 이들 암석의 분화단계가 잘 반영되지 못한 것은 암석의 풍화과정과 정도에 따른 환경방사성 핵종들의 거동 및 분포 특성을 달리하는 것이 한 원인으로 사료된다.

3. 토양 내 우라늄 및 우라늄과 토륨붕괴계열의 환경방사성 핵종들의 농도는 그 토양의 모암의 종류에 관계없이 암석에서 높게 나타난다. 이는 암석의 풍화

작용과 토양형성작용 동안의 이들 방사성 핵종들이 토양 내 유기물, 점토광물 및 철-과 망간-산화물에 선택적으로 흡착되어 부하되기 때문이다.

4. 환경방사성 핵종들의 방사능이 잔류토양과 암석에서와의 상관관계가 낮게 나타나는 것은, 모암의 환경방사성 핵종들의 방사성 농도에 의한 영향보다, 토양의 구성성분과 암석의 풍화작용 및 토양형성작용 동안 이들 핵종들과 그들의 모핵종들의 거동(용탈 및 흡착) 특성에 의한 영향이 더 큼을 시사한다.

5. 전반적으로 화강암질 암석에서 유래된 토양이 화산암류의 토양에서 보다 토양가스 내 라돈의 방사성이 높은 경향을 보인다. 그러나 토양 내 라돈의 방사능은 토양 및 암석의 라듐 및 우라늄의 농도와 아주 낮은 정도의 상관관계 보인다. 이는 같은 종류의 암석에서 유래된 잔류토양의 경우에도, 풍화작용과 토양형성작용 동안 우라늄이 쉽게 용탈되어 토양 내 라듐 함량을 잘 반영하지 않으며, 토양가스 내 라돈의 함량은 토양의 발달 상태, 측정 당시의 토양의 온도와 습도 및 지형적 영향에 의해 달라 질 수 있음을 잘 시사한다.

사 사

이 논문은 2007년도 부산대학교 핵물리·방사선기술연구소와 2006년 부산대학교 기초과학연구원의 일부 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사한다.

참고문헌

김동학, 황재하, 박기화, 송교영, 1998, 한국지질도 (1:250,000) 부산지질도폭 및 설명서, 과학기술부, 12 p.
 김인수, 1998, 부산지역 백악기 다대포층에 대한 고자기학적연구: 그의 층서적, 지구조적 의의, 대한지질학회, 24, 211-233.
 성정욱, 2001, 부산주변 토양의 환경방사능 측정, 부산대학교 물리학과 이학석사 학위논문, p 53.
 손문, 함세영, 김인수, 이용희, 정훈, 류춘길, 송원경, 2002, 부산시 금정산 일원의 지하수 유동해석을 위한 단열계분석, 지질공학회지, 12, 305-317.
 손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식, 1978, 한국지질도-동래월내 도폭, 자원개발연구소, p. 27
 이진용, 2008, 지하수내 우라늄, 라듐과 라돈의 발생, 건강 위해 및 저감방법에 대한 고찰, 지질학회지, 44, 341-352.
 이효민, 김진섭, 안정근, 손은진, 문기훈 (2006) 부산지역 암석, 토양, 지하수 및 지하공간에 대한 라돈의 분포 특성 연구, 대한지질학회 추계학술발표회 초록집, pp. 146.
 임인철, 2004, 부산지역 일반주택에서의 라돈농도측정, 대한방사선기술학회, 방사선기술과학, 27, 29-33.

장태우, 강필중, 박태환, 황상구, 이동우, 1983, 한국지질도-부산가덕 도폭, 한국동력자원연구소, 22 p.
 전효택, 2000, 지구화학환경에서의 라돈농도분포와 라돈농도의 지배요인(사례연구), 대한지질공학회, 10, 189-214.
 제현국, 강치구, 전효택, 1998a, 기반암에 따른 토양가스 ²²²Rn 농도의 분포에 관한 기초연구, 자원환경지질학회지, 31, 415-424.
 제현국, 강치구, 전효택, 1998b, 서울대학교 관악캠퍼스 지역에서의 실내 라돈 농도 분포, 자원환경지질학회지, 31, 425-430.
 제현국, 전효택, 2002, 시계열분석에 의한 토양 가스 라돈 농도의 변화특성 고찰, 서울자원공학회, 39, 423-433.
 홍영국, 1997, 대전시 지역 라돈 환경 지화학 연구, 자원환경지질학회지, 30, 51-60.
 홍영국, 김승오, 김통권, 1998, 서울 지하철역 승강장 및 토양내 유해라돈함량 연구, 자원환경지질학회지, 31, 215-222.
 홍영국, 홍세선, 2002, 국내 기반암의 자연 방사성 원소 함량과 라돈의 유해성(요약문), 한국지구과학회 춘계학술발표 논문요약집, 64.
 Abumurad, K.M. and Al-Tamimi, M., 2001, Emanation power of radon and its concentration in soil and rocks, Radiation Measurements, 34, 423-426.
 Al-Shereideh, S.A., Bataina, B.A. and Ershaidat, N.M., 2006, Seasonal variations and depth dependence of soil radon concentration levels in different geological formations in Deir Abu-Said District, Irbid-Jordan, Radiation Measurements, 41, 703-707.
 Baixeras, C., Erlandsson, B., Font, L.I. and Jansson, G., 2001, Radon emanation from soil samples, Radiation Measurements, 34, 441-443.
 Barillon, R., zgms, A., and Chambaudet, A., 2005, Direct recoil radon emanation from crystalline phases. Influence of moisture content, Geochimica et Cosmochimica Acta, 69, 2735-2744.
 Bahtijari, M., Stegnar, P., Shemsidini, Z., Ajazaj, H., Halimi, Y., Vaupoti, J. and Kobal, I., 2007, Seasonal variation of indoor air radon concentration in schools in Kosovo, Radiation Measurements, 42, 286-289.
 Faure, G. and Mensing, T. M., 2004, Isotopes: principles and applications, Wiley, 928 p.
 Garver, E. and Baskaran, M., 2004, Effects of heating on the emanation rates of radon-222 from a suite of natural minerals, Applied Radiation and Isotopes, 61, 1477-1485.
 Gervino, G., Barca, D., Bruno, S., Bonetti, R. and Manzoni, A., 2007, Annual average and seasonal variations of indoor radon concentrations in Piedmont (Italy) using three different detection techniques, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 572, 254-256.
 Gueniot, B., Munier-Lamy, C. and Berthelin, J., 1988, Geochemical behavior of uranium in soils, part I. Influence of pedogenetic processes on the distribution of ura-

- nium in aerated soils, *Journal of Geochemical Exploration*, 31, 21-37.
- Greeman, D.J., 1991, The geochemistry of uranium, thorium, and radium in soils of the eastern United States, Ph. D dissertation, Pennsylvania State University, 225 p.
- Iakovleva, V.S. and Ryzhakova, N.K., 2003, Spatial and temporal variations of radon concentration in soil air, *Radiation Measurements*, 36, 385-388.
- Iskandar, D., Yamazawa, H. and Iida, L., 2004, *Applied Radiation and Isotopes*, 60, 971-973.
- Kovach, E.M., 1945, Meteorological influences upon the radon-content of soil gas, *American Geophysical Union*, 26, 241-248.
- Ramola, R.C., Choubey, V.M., Negi, M.S., Prasad, Y. and Prasad, G., 2008, Radon occurrence in soil-gas and groundwater around an active landslide, *Radiation Measurements*, 43, 98-101
- Rose, A.W., Hawkes, E.H., and Webb J.S., 1979, *Geochemistry in Mineral Exploration*, Academic Press, London, 656 p.
- Sakoda, A., Hanamoto, K., Ishimori, Y., Nagamatsu, T. and Yamaoka, K., 2008, Effects of some physical conditions on leaching rate of radon from radioactive minerals originating from some hot springs, *Radiation Measurements*, 43, 106-110.
- Sun, H., Furbish, D.J., 1995, Moisture content effect on radon emanation in porous media, *Journal of Contaminant Hydrology*, 18, 239-255.
- Washington, J.W. and Rose, A.W., 1992, Temporal variability of radon concentration in the interstitial gas of soils in Pennsylvania, *Journal of Geophysical Research*, 97, 9145-9159.
- Winkler, R., Ruckerbauer, F. and Bunzl, K., 2001, Radon concentration in soil: a comparison of the variability from different methods, spatial heterogeneity and seasonal fluctuations, *The Science of the Total Environment*, 272, 273-282.

2008년 7월 16일 접수

2008년 7월 17일 심사개시

2008년 9월 29일 채택