

라돈방사능농도의 측정을 통한 지진발생 예측에 관한 연구

김 윤 신 · 이 철 민 · 이 승 일 · Takao Iida · Katsuhiro Yoshioka***
한양대학교 환경 및 산업의학연구소, '서라벌대학 생명보건학부,
"일본 나고야대학 원자핵공학과 · "시만네현 환경과학연구소
(2003년 4월 11일 접수; 2003년 6월 2일 채택)

A Study of the Prediction of Earthquake Occurrence by Detecting Radon Radioactivity

Yoon Shin Kim, Cheol Min Lee, Seung Il Lee*,
Takao Iida** and Katsuhiro Yoshioka***

Institute of Environmental and Industrial Medicine, Hanyang University, Seoul 151-742, Korea

**Department of Environmental Health, Sorabol College, Kyungju 780-711, Korea*

***Department of Nuclear Engineering, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan*

****Shimane Prefectural Institute of Environmental Science, Matsue 690-0122, Japan*

(Manuscript received 11 April, 2003; accepted 2 June, 2003)

The purpose of this study was to predict occurrence of earthquakes in Korea by measuring the concentration of radon radioactivity in the air and in the underground water. Two monitoring systems of radon concentration detection in the air were installed in Seoul, East Coast area, whereas of radon concentration in the underground water in Kyungju area during December, 1999 to June, 2001. The distribution of radon concentration in the air in Seoul is as follows : winter ($10.10 \pm 2.81 \text{ Bq/m}^3$), autumn ($8.41 \pm 1.35 \text{ Bq/m}^3$), summer ($5.83 \pm 0.05 \text{ Bq/m}^3$) and spring ($5.34 \pm 0.44 \text{ Bq/m}^3$), whereas the distribution of radon in the air in the East Coast area showed some difference as follows : autumn ($14.08 \pm 5.75 \text{ Bq/m}^3$), summer ($12.04 \pm 0.53 \text{ Bq/m}^3$), winter ($12.02 \pm 1.40 \text{ Bq/m}^3$) and spring ($8.93 \pm 0.91 \text{ Bq/m}^3$). In the meanwhile, the distribution of radon in the water is as follows : spring ($123.59 \pm 16.36 \text{ count/10min}$), winter ($93.95 \pm 79.69 \text{ counter/10min}$), autumn ($68.96 \pm 37.53 \text{ counter/10min}$) and spring ($34.45 \pm 9.69 \text{ counter/10min}$). The daily range of the density of radon concentration in Seoul and East Coast area was between 5.51 Bq/m^3 - 9.44 Bq/m^3 , 7.15 Bq/m^3 - 15.27 Bq/m^3 , respectively. Correlation of the distributions of radon concentrations in the air and in underground water with earthquake showed considerable variations of radon concentration before the occurrence of the earthquake. The results suggested that radon radioactivity seemed to be helpful for the prediction of the occurrence of earthquake.

Key words : Earthquake, Prediction, Radon radioactivity, Air, Underground water

1. 서 론

한반도는 그 동안 지진 안전지대처럼 여겨져 왔으나 근래에 지진이 다시 급증하고 있음을 알 수 있다. 지진은 불가항력적인 자연현상으로 그 피해 예방을 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다.¹⁾ 지진

을 예측하기 위한 연구는 전진활동을 비롯, 지진이 발생하기 전에 일어나는 몇 가지 전조현상이 임박한 지진을 예측하는데 도움을 줄 수 있는 경우가 있는데 이를 이용하여 대형 지진이 발생하기 전에 지진을 예측하고 주민들에게 통보를 하여 주민들을 대피시키기 위한 연구로 지진파 P파의 속도를 이용한 지진예측연구, 지평면 수준의 변화를 관측함으로써 지진을 예측하는 연구, 라돈방출량의 변화량을 관측함으로써 지진을 예측하는 연구, 암석의 전

Corresponding Author : Cheol Min Lee, Institute of Environmental and Industrial Medicine, Hanyang University, Seoul 151-742, Korea
Phone : +82-2-2290-1510
E-mail : spica@ihanyang.ac.kr

기저항 값의 관측을 통한 지진의 예측 연구, 지진 활동 비율의 변화를 관찰함으로써 지진을 예측하는 연구 등이 지진예측 연구로서 이용되고 있다.^{2~6)} 또한 지진 예측을 위해 지진과 관련된 대기, 토양, 지하수층의 라돈농도 변화와의 관련성을 찾기 위한 연구가 수행되어져 왔으며, 라돈뿐만 아니라 지진과 관련된 수많은 다른 지구물리학적, 지구화학적 변화에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.^{7~9)}

성공적인 지진예측에 관한 사례로는 1975년 2월 4일 중국 만주지역 하이쳉(海城) 지방에서 24시간 내에 강력한 지진이 발생할 증거가 충분하다고 판단하여 중국 정부가 주민에게 대피 지시를 내린 결과 10만 명 이상의 인명을 구한 것으로 평가되며 현재까지 전 세계에서 가장 성공적인 지진의 예측으로 기록되고 있다.¹⁾ 또한 지진예측 연구 사례 중 일본에서 조사된 연구결과에 따르면 1991년 2월 跡津川 단층 내 규모 3.9의 지진 전과 후에서 라돈농도가 30% 정도 변화한 것이 확인되었으며, 최근 수 년간 세계 여러 나라에서 라돈을 이용한 지진예측 연구에서 지진발생과 라돈농도의 관측결과에서도 지진의 진도, 진원거리, 진원위치에 따라 라돈측정치의 규칙성이 나타나고 있는 것으로 보고되고 있다.¹⁰⁾

우리나라의 지진위험에 관한 연구는 1970년대 원자력발전소 부지의 지진안전성 확보를 위해 각 부지별로 지진위험도가 검토되기 시작하면서 이루어졌으나, 지진발생예측에 관한 연구는 아직 초기단계에 있는 실정이다.

이에 본 연구는 지각, 암석 및 지하수로부터 봉괴되는 천연방사성물질인 라돈의 대기 및 수 중 발생량을 연속적으로 관측할 수 있는 관측장비를 이용하여 관측된 자료와 관측기간 중에 발생된 국내 및 주변지역의 지진 발생자료와의 스펙트럼 분석 결과를 제시함으로써 향후 지진발생예측에 관한 연구 중 천연방사성물질인 라돈을 이용한 지진 예측 연구분야에 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 측정장비의 특성 및 측정방법

라돈을 이용한 지진발생예측 연구에 있어 가장 중요시되는 것은 지하수 및 대기 중의 라돈 변화량의 장기간에 걸친 연속적인 관측이며, 또한 이를 관측·수집된 자료의 신뢰성에 관한 것이라 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 대기 및 수중 라돈변화량을 장기간 연속적으로 관측할 수 있는 측정장비를 이용하여 대기 및 수중 라돈변화량을 연속적으로 관측하였다. 본 연구에서 사용된 대기 중 라돈

농도 검출기는 일본 나고야대학의 원자핵공학과에서 개발되었으며, 수중 라돈농도 검출기는 일본 기후대학에서 개발된 것으로, 이들 검출기에 대한 신뢰성 및 유용성에 관한 내용의 보고서가 다수 출간되어 있다.^{10,11)}

Fig. 1은 대기 중 라돈 변화량을 장기간 연속적으로 관측할 수 있는 Continuous Electrostatic Radon Monitor(ERM)의 개략적인 도면을 나타낸 것으로 검출기는 반경 200 mm의 알루미늄 반구의 중심부에 설치되어 있으며, 관측기의 부피는 대략 16.8 L로 되어 있다. 공기는 펌프에 의해 P_2O_5 가 들어있는 vapor trap과 membrane filter를 거쳐 반구 모형의 관측기 내부로 1 ℓ/min의 유량으로 유입된다. 이 과정에서 에어로솔과 라돈 자손 및 대기 중의 습기가 제거된다. 라돈은 알파입자를 방출하면서 ^{218}Po 원자로 붕괴되며, 이때 생성된 ^{218}Po 원자들은 양전하를 가지게 된다.¹²⁾ 이 양전하의 $^{218}Po^+$ 이온은 10 mg/cm³의 발광체인 ZnS(Ag)로 코팅된 Al Mylar(0.9 mg/cm²) 전극에 정전기적으로 포집된다.¹³⁾ 전극에 포집된 $^{218}Po^+$ 이온의 붕괴로 방출된 알파입자의 투과에 의해 발생된 섬광은 직경 38 mm의 photomultiplier tube에 의해 검출, 증폭되어 interface를 통해 PC(NEC PC-9801RX)로 전송된다. PC로 전송된 증폭된 신호는 다음과 같은 식을 이용하여 매 시간 실시간 라돈농도로 전환·저장된다.^{13,14)}

$$Q(I) = \frac{C(I) - \sum_{i=1}^5 C(I-i)}{CF \cdot F(I)}$$

여기서,

$Q(I)$: 시간간격 I 동안의 평균라돈농도(Bq/m³)

$C(I)$: 시간간격 I 동안 발생된 알파입자의 수

$C(I-i)$: 시간간격 I-i 동안 라돈 자손이 전극에 포집 될 것으로 기대 되는 알파입자수

CF : 교정상수

$F(I)$: 라돈 자손의 붕괴율로 ^{218}Po 에 대한 전극의 포집효율 및 알파입자의 계수 시간에 대한 함수값에 의해 주어진 교정상수

Fig. 2는 지하수 중의 라돈을 관측하는 관측기의 개략도를 나타낸 것이다. 검출부는 스테인레스 용기, PIN 포드다이오드, 앰프모듈, 커넥터, 바이어스 전지 등으로 되어 있으며, 이들 검출부 전체를 방수 처리하기 위해 검출부 전체를 염화비닐형 방수 밀폐용기에 넣어 바닥부분의 물과 접촉부분의 물은 투과시키지 않으며 라돈 가스만이 선택적으로 투과될 수 있는 기능성 분리막을 붙였다. 막이 물과 접촉되는 면적은 123 cm²로 되어 있으며, 또한 상부에

라돈 방사능 농도의 측정을 통한 지진발생 예측에 관한 연구

는 전원과 신호케이블을 뽑아내기 위한 방수 커넥터가 붙어 있다. 기능성 분리막은 다이셀 화학공장(주)제의 [CELGARD]라 불리는 폴리프로필렌제의 마이크로 폴러스 필름을 사용했다. 이 막은 소수성(疏水性)으로 두께 $25\text{ }\mu\text{m}$, 최대 구멍 지름 $0.125\text{ }\mu\text{m} \times 0.05\text{ }\mu\text{m}$ 로 여러 등급이 있다. [CELGARD]의 경계표면장력은 35 dyne/cm 이고 물의 표면장력은 72.8 dyne/cm 로 물의 표면장력이 크기 때문에 이 막은 물을 투과시키지 않는다. 그러나 가스에 대해서는 매우 적은 압력에서도 투과시키는 사실이 실험을 통해 확인되었다.

검출기를 지하수 중에 가라 앉혀 두면 수압이 높아져서 막을 사이에 두고 용기내의 기체압과 수압과의 사이에 압력차가 발생한다. 이 결과 지하수 중에 용해되어 있는 라돈가스는 막을 통하여 관측기 내부에 유입되고, 유입된 가스가 관측기 내부에

서 방사평형을 이룬 후 막을 사이에 둔 양쪽의 압력이 균등하게 된다. 이렇게 일정한 압력이 유지되면 지하수 중에 용해되어 있는 라돈의 양과 검출기 내부에 기체상태로 존재하는 라돈의 양이 일정하게 되므로 이러한 방법을 이용하여 지하수 중의 라돈농도의 변화를 관측하게 된다.

이 모니터는 지하수 중의 $10,000\text{ Bq/m}^3$ 의 고농도에서 0.5 Bq/m^3 의 저농도의 라돈을 관측할 수 있는 장점을 가지고 있다.¹⁰⁾

지하수 중의 라돈 관측기로부터 출력되는 자료는 다음 Fig. 3과 같이 10분 간격으로 전체 256개의 채널에 대한 값이 출력된다. 이렇게 256개의 채널로 출력된 관측자료 중 라돈 자핵종의 농도(^{218}Po , ^{214}Po)를 나타내는 채널 137, 171번만을 추출하여 정렬한 후 데이터베이스를 구축하기 위해 Fig. 4와 같이 MathWorks, Inc.의 MATLAB(version 5.2.0.3048)

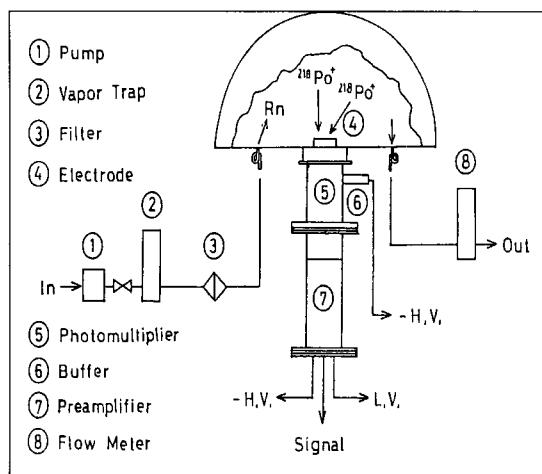


Fig. 1. The Schematic diagram of Continuous Electrostatic Radon Monitor (ERM).

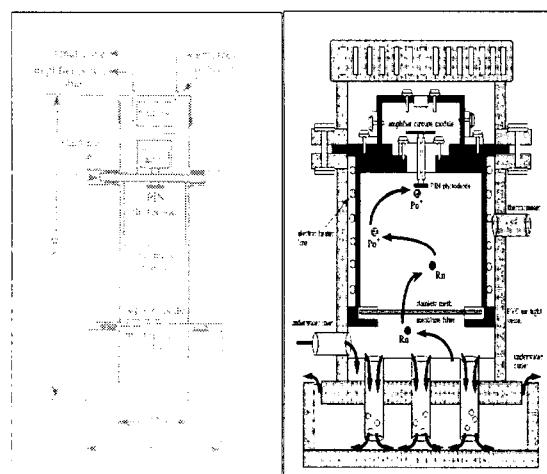


Fig. 2. Schematic diagram of radon monitor in underwater.

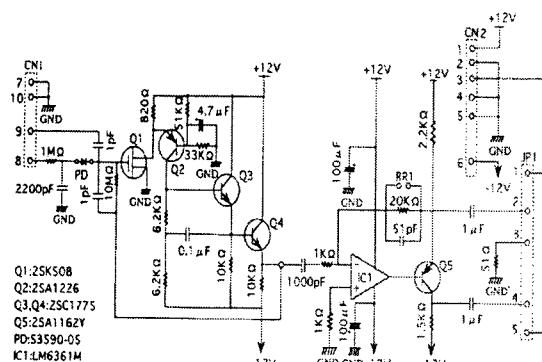


Fig. 3. Diagram of an electric circuit of radon monitor in water.

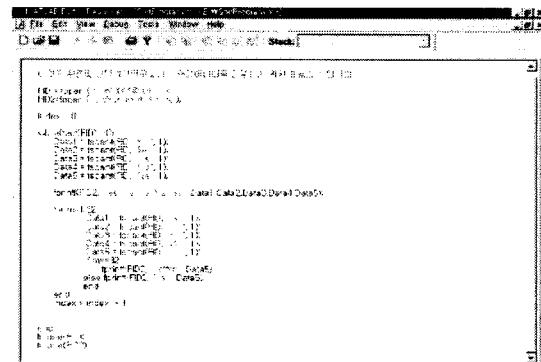


Fig. 4. Program in order to extract observed radon value.

을 이용하여 정렬프로그램을 작성한 후 이 프로그램의 운영을 통해 지하수 중 라돈변화량 관측자료의 데이터베이스를 구축하였다.

2.2. 관측장소 및 연구기간

본 연구에서는 두 대의 대기 중 라돈 변화량 측정장치와 한대의 지하수의 라돈 변화량 측정장치를 각각 서울, 동해 및 경주에 설치하여 1999년 12월부터 2001년 6월까지 대기 및 지하수 중 라돈 변화량을 장기간 연속적으로 관측하였으며, 동일 기간 동안 기상청에서 제공하고 있는 지진 관측자료를 규모 및 발생지역별로 분류하여 데이터베이스를 구축하였다.

관측장소는 지진예측에 관한 라돈 변화량의 연속적이며, 신뢰성 있는 자료 수집을 위해 다음의 기준을 바탕으로 선정하였다.

첫째, 지진의 발생율이 높거나 또는 지진의 발생 가능성성이 예측되는 지역을 대상지역에 포함되도록 고려하였다.

둘째, 인구 밀도가 높고 인구의 이동이 많은 지역을 연구대상에 포함되도록 고려하였다.

셋째, 정전 등의 이상으로부터 관측이 원활히 이루어지도록 관측기의 관리가 용이한 관련 연구기관 및 대학 연구소가 있는 지역으로 선정하였다.

이러한 선정기준을 통해 대기 중 라돈변화량 측정을 위해 서울의 한양대학교 내 환경 및 산업의학 연구소와 동해의 서울대학교 해양연구센터 그리고 지하수 중의 라돈변화량의 측정을 위해 경주 서라벌대학 내 환경기술연구소에 각각의 측정장치를 설치하여 장기적으로 대기 중 한시간마다 라돈변화량 및 지하수 중 10마다 라돈변화량을 연속적으로 관측하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1. 지진관측자료의 데이터베이스 구축

지진발생을 예측하는데 있어 과거 발생되었던 지진의 분포 및 발생현황에 대한 검토과정은 필수적이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 우리나라에서 발생된 연도별 지진의 발생현황에 대한 데이터베이스를 구축하기 위해 1980년 1월부터 2001년 6월까지 한반도에서 발생된 지진 발생현황 자료를 바탕으로, Fig. 5와 같이 MathWorks, Inc.의 MATLAB(version 5.2.0.3048)을 이용하여 첫째, 발생지역별 빈도횟수 산출, 둘째, 규모가 가장 작은 지진으로부터 규모가 큰 지진 순으로 배열, 셋째, 규모별 지진의 발생빈도를 나타내기 위해 규모의 범위를 지정하면 지정된 규모 범위에서 발생된 지진만을 선택적으로 산출 할 수 있는 프로그램을 작성하여 운영하였다.

Fig. 6은 첫 번째 프로그램 명령어의 실행에 의해 산출된 결과를 정리하여 나타낸 것으로 1980년부터 2001년 6월까지 한반도에서 발생된 지진을 발생지역별로 구분하여 각 지역별 지진발생횟수를 나타낸 것이다. 경상북도에서 발생된 지진의 횟수는 76회로 한반도에서 가장 많은 지진발생 빈도수를 나타냈으며, 다음으로 지진이 많이 발생된 지역은 황해도로 51회의 지진이 발생된 것으로 나타났다. 또한 울릉도와 함경북도의 경우 1980년대 이후 지금까지 한 차례의 지진도 발생하지 않은 것으로 관측되었다. 주요도시 즉, 서울특별시를 비롯한 6개 광역시(부산, 인천, 대전, 광주, 대구, 울산) 중 가장 많은 지진 발생빈도를 보인 곳은 서울특별시로 총 473회의 지진발생 중 23회의 지진이 발생되어 약 4.7%의 지진 발생율을 나타냈다. 또한 본 연구의 수중 라돈 측정기를 설치한 경상도 지역의 경우

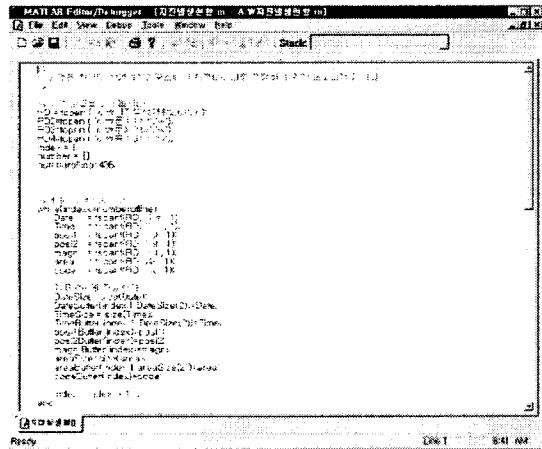


Fig. 5. Program to utilize the database of earthquake.

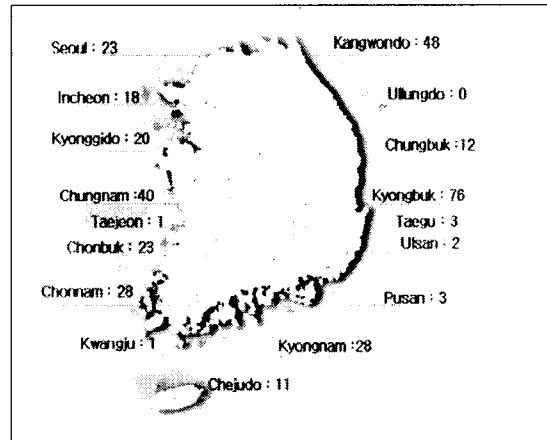


Fig. 6. Frequencies of earthquake occurrence in Korea.

라돈방사능농도의 측정을 통한 지진발생 예측에 관한 연구

1980년 이후, 발생된 지진의 횟수는 전체 473회의 지진 발생 중 112회의 지진이 발생되어 약 23.7%의 높은 지진 발생율을 보였는데, 이는 경상도에 위치하는 양산단층이 지진을 유발할 가능성이 있는 활동성 단층¹⁵⁾으로 지진이 빈번하게 발생하게 된 것으로 사료된다.

Fig. 5에서 제시한 프로그램 명령 중 두 번째 명령인 규모가 가장 작은 지진으로부터 규모가 큰 지진의 순으로 1980년 이후부터 2001년 6월까지 발생된 지진을 재배열하여 나타낸 결과, 1980년 이후 지금까지 관측된 지진 중 가장 낮은 규모의 지진으로는 1993년 7월 20일 4시 52분 37초에 위도 37.1도, 경도 129.2도 지점인 강원도 삼척 원덕읍 남서쪽 약 20 km 지점과 1994년 12월 19일 17시 25분 55초에 위도 34.9도, 경도 126.7도 지점인 광주시 남서쪽 약 40 km 지역에서 발생된 규모 1.9의 지진으로 나타났으며, 가장 규모가 큰 지진은 1994년 10월 4일 오후 10시 25분 23초에 위도 43.4도, 경도 147.9도 지점인 일본 홋카이도 동쪽 약 250 km 해역에서 발생된 규모 7.9의 지진으로 나타났다. 또한

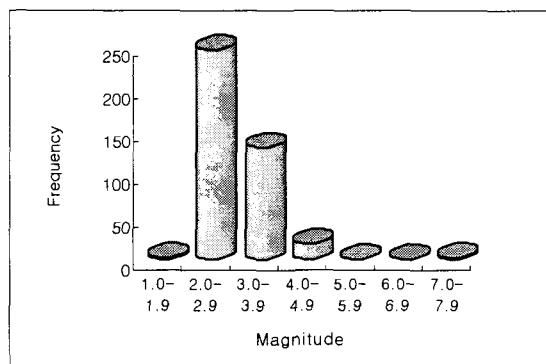


Fig. 7. Frequencies of earthquake occurrence by magnitude in Korea(1980 - 2000).

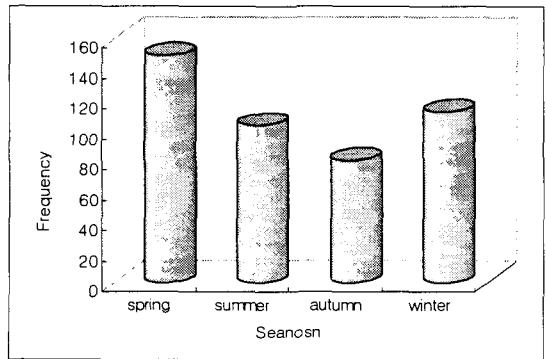


Fig. 8. Seasonal frequencies of earthquake occurrence in Korea(1980 - 2000).

한반도에서 발생된 지진은 규모 1.9에서 5.3을 가진 지진이 발생되어 왔으며, 한반도 근해에서 발생된 지진까지 포함하면 규모 1.9의 약한 지진으로부터 규모 7.9의 강진이 발생 된 것으로 조사되었다.

Fig. 7은 Fig. 5에서 제시한 프로그램 명령 중 세 번째 명령인 지정된 규모 범위에서 발생된 지진만을 선택적으로 산출하는 명령을 이용하여, 1980년 이후부터 2001년 6월 까지 발생된 지진을 규모 1의 크기로 나누어 각 범위에 속하는 지진의 빈도수를 산출한 결과이다. 1980년 이후 규모 2.0에서 2.9사이의 지진 발생 빈도가 244회로 한반도에서 가장 빈번하게 발생된 것으로 나타났으며, 규모 7.0이상의 강진이 2회 있었던 것으로 조사되었다. 또한 규모 3.9 이하의 지진의 발생빈도는 377회로 전체 473회 지진 발생빈도의 90%이상을 차지하고 있는 것으로 나타났으며, 규모 2.0에서 3.9이하 지진의 발생빈도는 377회로 전체 473회의 지진 발생빈도의 약 79%이상을 차지하고 있는 것으로 조사되었다.

Fig. 8은 1980년부터 2000년 6월 까지 우리나라에서 발생한 지진의 계절별 빈도분포를 나타낸 것으로 봄철 지진 발생이 149회로 가장 많았으며, 겨울철 112회, 여름철 103회, 가을철 80회의 순으로 낮은 발생빈도수를 나타내 지진의 계절별 발생빈도는 봄-겨울이 높은 반면 여름-가을이 낮은 발생빈도를 나타냈다.

Fig. 9은 우리나라에서 발생된 지진의 일일 시간별 분포를 나타낸 것으로 시간대별 지진발생 빈도는 오후 3시부터 4시 사이에서 34회로 가장 높은 발생 빈도를 나타냈으며, 오전 9시부터 10시 사이에 5회로 가장 낮은 발생 빈도를 나타냈다.

3.2. 대기 중 라돈 변화량

대기 중 라돈변화량의 관측을 통한 지진 예측에 있어 가장 중요한 변수로 작용하는 것은 지진에 의

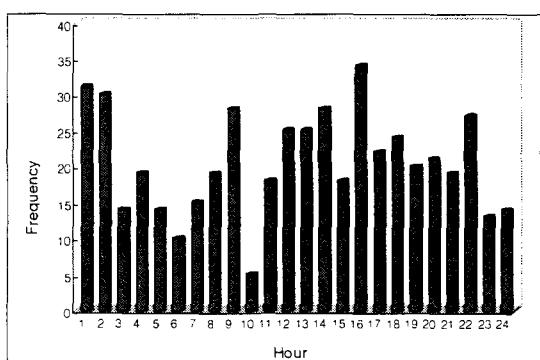
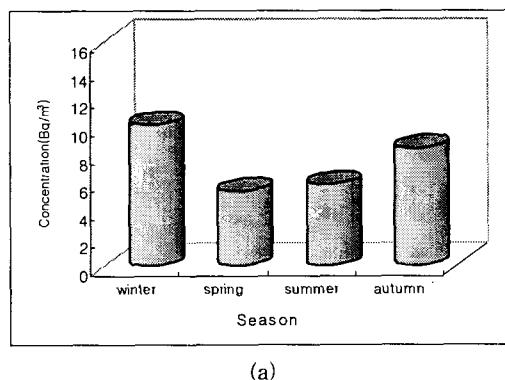


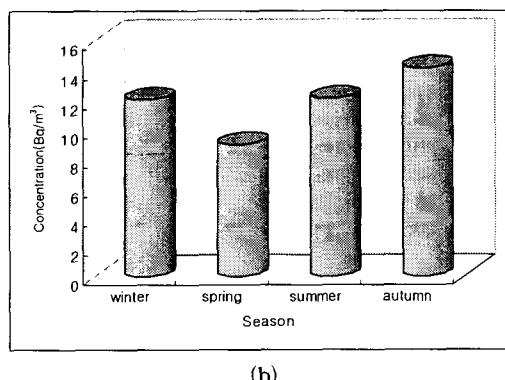
Fig. 9. Hourly frequencies of earthquake occurrence in Korea(1980 - 2000).

한 라돈변화량에 혼란변수로 작용할 수 있는 요인을 제거하는 것으로 이러한 혼란변수를 noise라 표현하고 있다. 본 연구는 외국에서 선행된 많은 연구 활동들의 연구기간에 비해 비록 2년이라는 짧은 기간의 관측기간이었으나 이러한 noise를 제거하기 위한 일환으로 대기 중 라돈농도의 계절적 분포특성, 일일 시간별 분포 및 기상요인과의 관계 등을 조사하였다.

Fig. 10은 서울과 동해의 대기 중 라돈 변화량의 계절적 분포를 나타낸 것으로 이는 1999년 12월부터 2000년 11월까지 한해동안 12월부터 3개월씩 겨울, 봄, 여름, 가을로 구분하여 나타낸 것이다. 서울의 계절별 농도분포를 살펴보면 겨울($10.10 \pm 2.81 \text{ Bq/m}^3$), 가을($8.41 \pm 1.35 \text{ Bq/m}^3$), 여름($5.83 \pm 0.05 \text{ Bq/m}^3$), 봄($5.34 \pm 0.44 \text{ Bq/m}^3$)의 순으로 가을-겨울이 봄-여름에 비해 높은 농도를 보이는 것으로 조사되었으며, 동해의 계절별 농도분포는 가을($14.08 \pm 5.75 \text{ Bq/m}^3$), 여름($12.04 \pm 0.53 \text{ Bq/m}^3$), 겨울($12.02 \pm 1.40 \text{ Bq/m}^3$), 봄($8.93 \pm 0.91 \text{ Bq/m}^3$)의 순으로 나타나 여름-가을이 봄-겨울에 비해 높은 농도를 보이는 것으로 조사되었다.



(a)



(b)

Fig. 10. Seasonal distribution of radon concentration
a) Seoul, b) East Coast.

Fig. 11은 서울과 동해의 1999년 12월부터 2000년 11월까지의 1년동안 공기중 일일 시간별 라돈농도분포를 나타낸 것이다. 서울의 일일 시간별 농도의 범위는 $5.51 \text{ Bq/m}^3 \sim 9.44 \text{ Bq/m}^3$ 으로 6시부터 9시 사이에 높은 농도분포를 나타낸 반면, 15시부터 19시 사이에 낮은 농도분포를 나타냈다. 또한 농도의 최대 값(9.44 Bq/m^3)과 최소 값(5.51 Bq/m^3)사이의 농도차이(3.93 Bq/m^3)는 약 2배에 가까운 농도차이를 보였다. 동해의 일일 시간별 농도의 범위는 $7.15 \text{ Bq/m}^3 \sim 15.27 \text{ Bq/m}^3$ 으로 2시부터 6시 사이에 높은 농도분포를 나타낸 반면, 13시부터 18시 사이에 낮은 농도분포를 나타냈다. 또한 농도의 최대값(15.27 Bq/m^3)과 최소값(7.15 Bq/m^3)사이의 농도차이(8.12 Bq/m^3)는 서울과 유사한 약 2배에 가까운 농도차이를 보였다. 두 지역의 일일 시간별 농도분포는 저녁 이후 농도가 증가하기 시작하여 자정부터 새벽사이에 높은 농도분포를 나타냈으며, 일출 이후에 농도가 서서히 감소하기 시작하여 오후 1시부터 6시 사이에 낮은 농도분포를 나타내고 있음을 알 수 있었다.

이러한 서울지역의 계절 및 두지역의 일일 시간대별 농도분포는 한국원자력문화재단^[16]에서 출판한 「알기쉬운 방사선 이야기」에서 제시된 ‘우리나라 계절적 자연방사선량은 여름철보다 겨울철이 약간 높은 값을 보이며, 하루 중 시간대별로 보면 새벽 4시에서 오전 7시까지가 최고치를 보이다가 오후 1시에서 4시 사이에서 최소값을 나타낸다’와 같이 우리나라의 일반적인 자연방사선의 계절적, 일일 시간대별 농도분포와 유사한 분포를 보였으며, L. Sesana^[17]에 의해 1997년부터 2000년까지 Italy의 Milan에서 조사된 실외 라돈농도분포의 계절 및 일일 시간대별 농도분포와 K. Yoshioka^[18,19]에 의해 일본에서 관측된 라돈농도분포의 계절 및 일일 시간대별 농도분포와 유사한 결과를 나타냈다. 이를

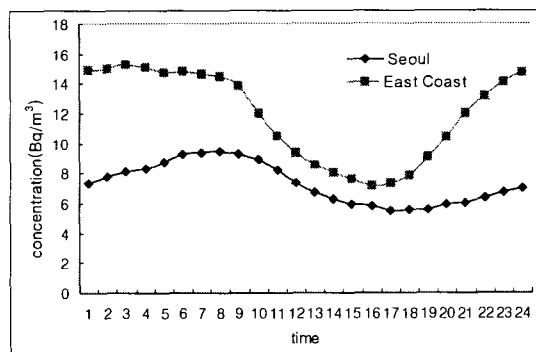


Fig. 11. Hourly distribution of radon concentration in Seoul and East Coast.

라돈방사능농도의 측정을 통한 지진발생 예측에 관한 연구

논문에서 계절적 라돈농도분포의 영향은 계절에 따른 토양 내 라돈의 방출율의 차이와 계절풍의 방향에 의한 주변 지역 라돈농도에의 영향에 의해 계절적 패턴이 발생한 것으로 고찰하고 있으며, 우리나라 계절적 라돈농도 패턴 또한 이들 논문에서 제시한 바와 같이 계절에 따른 토양 내 라돈의 방출율 차이와, 계절풍의 패턴에 의해 나타난 결과로 사료된다. 이에 반해 여름철이 겨울철보다 다소 높은 계절적 패턴을 보인 동해의 경우 해안가에 검출기가 설치되어 있어 계절에 따른 토양의 방출율에 의한 차이보다 계절풍에 의해 영향을 크게 받아 나타난 결과로 여겨지나 보다 정확한 원인을 규명하기 위해서는 주위 라돈농도조사 및 계절에 따른 바람장의 변화 등을 고려한 보다 정밀한 분석이 행하여져야 할 것으로 사료된다. 또한 국내 지진의 계절적 발생빈도분포와 동해의 계절적 라돈농도분포가 유사한 분포를 나타내고 있어 계절에 따른 지각변동이 대기 중 라돈농도 변화에 크게 영향을 미치고 있는 것으로 여겨진다.

서울 및 동해 두지역의 일일 시간대별 라돈농도 분포 패턴 역시 이들 연구 보고에서 제시하고 있는 일일 라돈농도분포는 당일 대기혼합고의 높이 변화에 영향을 받고 있다는 연구결과와 동일한 원인에 의한 것으로 여겨진다.

Table 1과 Table 2는 서울과 동해의 대기 중 라돈변화량과 혼란요인으로 알려져 있는 기상인자(기온, 습도, 기압)와의 상관관계를 나타낸 것으로 우선 앞에서 제시한 바와 같이 두 지역간에 일별, 계절별 라돈농도분포에 차이를 나타내고 있어 이들 두 지역간의 지역적 차이에서 오는 변화량을 고려하기 위해 각 지역에서 산출된 공기 중 라돈농도와 각 지역의 기상인자와의 상관성분석을 따로 분리하여 실시하였다.

라돈 변화량과 기온과의 상관성은 서울의 경우 약한 음의 상관성($r=-0.39$, $p<0.05$)을, 동해의 경우 약한 양의 상관성($r=0.21$, $p<0.05$)로 조사되어 대륙 지역에서의 라돈농도는 기온에 대해 음의 상관관계

를 해안지역은 양의 상관관계를 나타내고 있는 것으로 조사되었다. 습도와의 상관성은 서울의 경우 약한 음의 상관성($r=-0.15$, $p>0.05$)을, 동해의 경우에는 약한 음의 상관성($r=0.08$, $p>0.05$)을 나타냈으나, 두 지역 모두 라돈농도와 습도간의 상관관계에서는 통계적으로 유의하지 않았다. 이는 대기 중 라돈변화량은 습도에 큰 영향을 받지 않고 있음을 시사하고 있다. 또한 기압과의 상관성은 서울의 경우 양의 상관성($r=0.33$, $p<0.05$)을, 동해 또한 양의 상관성($r=0.35$, $p<0.05$)을 나타내 두 지역 모두 대기 중 라돈농도와 기압 간에는 양의 상관관계가 존재하고 있음을 알 수 있었다. 이 결과를 바탕으로 대기 중 라돈변화량 관측자료에 있어 기상요인이 라돈농도 변화에 영향을 미치고는 있지만 기상인자들의 일일 변화폭이 작다는 점과 두 변수들 간의 상관도가 작다는 점을 고려 할 때 대기 중 라돈농도의 급격한 변화는 지각 붕괴내 방사성물질 과정에서 발생되는 라돈 방출의 급격한 증감에 의한 것으로 사료된다.

3.3. 지하수 중 라돈 변화량

지하수는 지각 구성 원소들의 이동 및 재배치에 중요한 역할을 담당하며, 지화학연구, 광물탐사 연구에 지하수 중 환경 방사성 동위원소 측정기술이 유용한 수단으로 응용되는 경우가 많다. 지하수 중의 우라늄, 토륨 계열 방사성 핵종의 거동은 지화학, 우라늄 탐사 및 방사선 보건물리 연구에 유용하다.²⁰⁾ 또한 지하수 중의 라돈변화량은 대기중의 라돈변화량과는 달리 여러 혼란요인에 큰 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다. 이에 본 연구는 이러한 지하수 중 라돈변화량의 특성을 지진발생예측 연구에 이용하기 위해 높은 지진 발생율을 보이고 있는 활동성 양산단층의 영향지역으로 판단되는 경주시에 위치한 서라벌대학교 관정 내에 지하수 중 라돈변화량을 장기간 연속 관측할 수 있는 장비를 설치하여 지하수 중 라돈변화량을 모니터링 하여 왔다.

Table 1. The relationship between radon concentration in Seoul and meteorological factor

	Concen- tration	Temper- ature	Humidity	Pressure
Concentration	1.00	-0.39*	-0.15	0.33*
Temperature		1.00	0.42*	-0.80*
Humidity			1.00	-0.45*
Pressure				1.00

* Correlation is significant at the 0.05 level(2-tailed)

Table 2. The relationship between radon concentration in East Coast and meteorological factor

	Concen- tration	Temper- ature	Humidity	Pressure
Concentration	1.00	0.21*	0.08	0.35*
Temperature		1.00	0.50*	-0.80*
Humidity			1.00	-0.22*
Pressure				1.00

* Correlation is significant at the 0.05 level(2-tailed)

Fig. 12와 Fig. 13은 지하수 중 라돈변화량의 일일 시간별 분포와 계절별 분포를 나타낸 것으로 일일 시간대별 라돈변화량의 범위는 78.54 count/10min ~ 100.93 count/10min로 오후 2시에서 가장 높은 변화량을 나타냈으며, 오후 5시에 가장 낮은 변화량을 보였다. 계절적 분포는 봄(123.59 ± 16.36 count/10min), 겨울(93.95 ± 79.69 count/10min), 가을(68.96 ± 37.53 count/10min), 여름(34.45 ± 9.69 count/10min)의 순으로 높은 라돈변화량을 나타내고 있는 것으로 관측되었다. 이러한 결과는 겨울철 동안 얼어 있던 지각이 봄철에 해빙되면서 지각 중에 함유되어 있는 라듐의 붕괴가 활발하게 이루어짐으로써 지하수 중의 라돈변화량이 증가한 것으로 여겨지며, 겨울철 지하수 중 라돈변화량이 높게 나타난 것은 지표층 표면이 얼어 지표로부터 라돈이 대기 중으로 방출되지 않고 지하수에 용해됨으로써 지하수 중 라돈 변화량이 증가한 것으로 여겨진다.

3.4. 라돈변화량과 지진발생과의 관련성 장기간 연속 관측된 대기 및 지하수 중 라돈변화

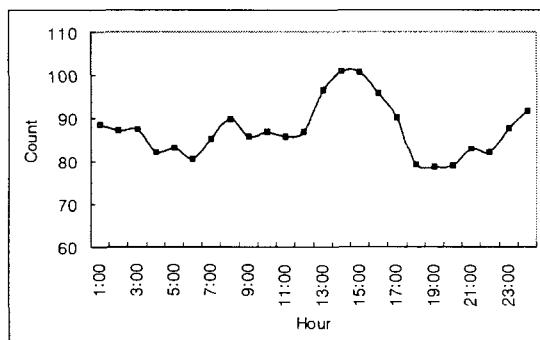


Fig. 12. Hourly distribution of radon concentration in underground water.

량과 지진 발생과의 관련성을 조사하기 위해 1999년 12월부터 2001년 6월까지 관측된 대기 및 수 중 라돈농도를 평균값으로 보정한 절대편차(absolute deviation)를 산출하여 사람이 느낄 수 있는 규모 3.0이상의 지진 발생일 전·후 각 10일간의 라돈농도 변화량을 조사하였다.

Fig. 14는 규모 3.0이상의 지진이 발생했을 때의 서울에 위치한 한양대학교에서 관측된 대기 중 라돈농도의 변화량을 나타낸 것이다. Fig. a)는 2000년 4월 12일 격렬비열도 북서쪽 약 40km 해역에서 발생된 규모 3.5의 지진 발생 전·후의 라돈농도의 변화량은 지진 발생 3일전까지 높은 라돈농도를 나타냈으며, 농도의 변화폭 또한 큰 것으로 조사되었다. 그러나 지진 발생 3일 전부터 라돈농도가 급격히 감소하여 지진이 발생된 후까지 낮은 라돈농도분포 및 작은 라돈농도의 변화 폭을 나타내었다. Fig. b)는 2000년 4월 29일 전북 군산 서쪽 약 90km 해역에서 발생된 규모 3.3의 지진 발생 전·후의 대기 중 라돈농도의 변화량을 나타낸 것

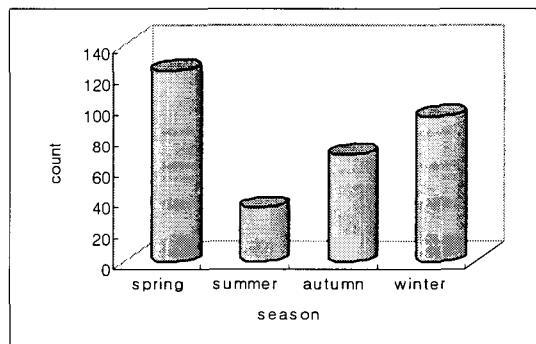
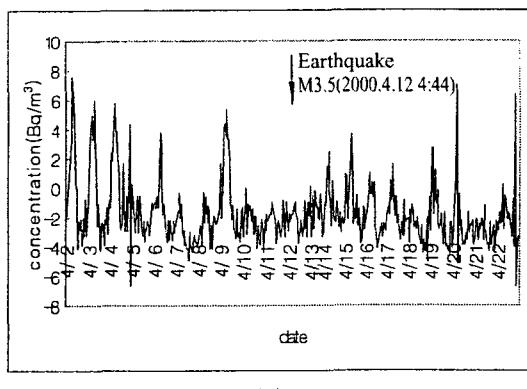
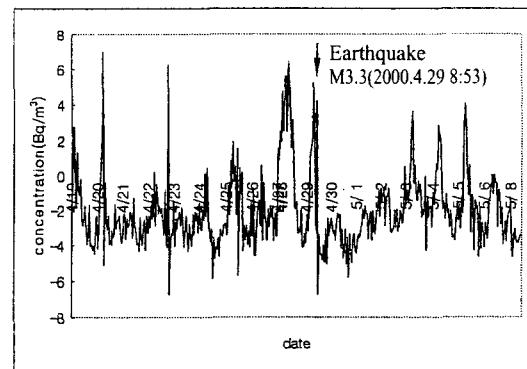


Fig. 13. Seasonal distribution of radon concentration in underground water.



(a)



(b)

Fig. 14. Relationship between the earthquake occurrence and the distribution of radon in Seoul.

라돈방사능농도의 측정을 통한 지진발생 예측에 관한 연구

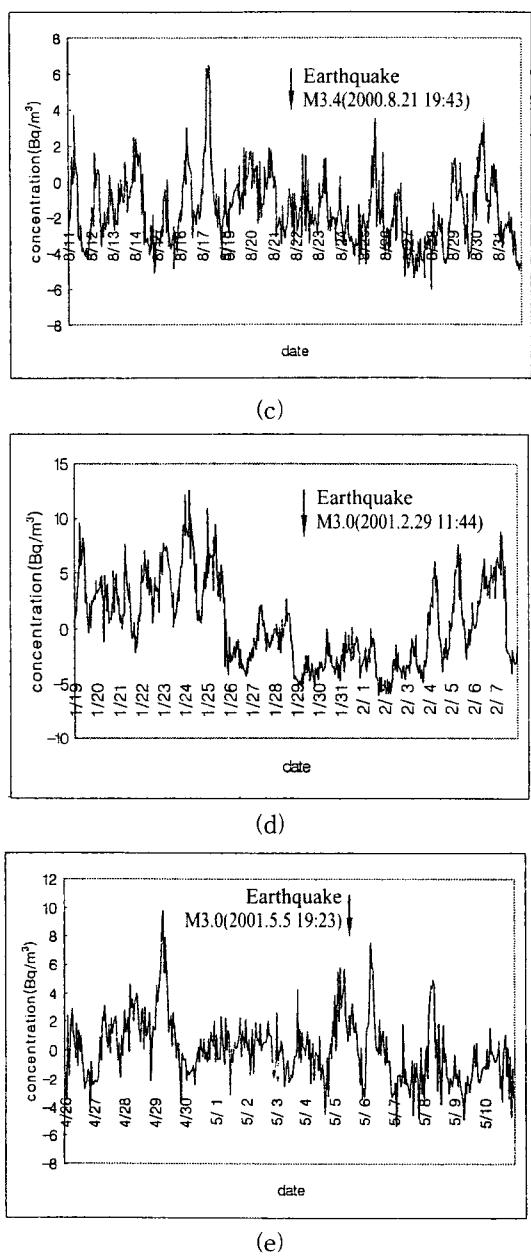


Fig. 14. continued.

으로 지진 발생 2일 전인 4월 27일에 급격히 라돈 농도가 증가하였다가 감소하는 큰 라돈농도의 변화를 보였으며, 지진이 발생된 후에는 라돈농도의 변화량이 감소하고 있는 것으로 조사되었다. Fig. c)는 2000년 8월 21일 평양 남동쪽 약 20 km 지역에서 발생된 규모 3.4의 지진 발생 전·후의 대기 중 라돈농도의 변화량을 나타낸 것으로 지진 발생 4일 전인 8월 17일에 급격히 라돈농도가 증가하였다가

급격히 감소한 후 지진이 발생된 후까지 낮은 라돈 농도분포 및 작은 라돈농도 변화폭을 나타냈다. Fig. d)은 2001년 1월 29일 전북 부안 서쪽 약 10 km 지역에서 발생된 규모 3.0의 지진 발생 전·후의 대기 중 라돈농도의 변화량을 나타낸 그림으로 이 또한 지진 발생 3일 전까지 높은 라돈농도 분포 및 급격한 라돈농도 변화량을 나타냈으며, 지진 발생 3일 전부터 낮은 라돈농도 및 작은 변화 폭을 나타냈다. Fig. e)는 2001년 5월 5일 백령도 남서쪽 약 30 km 해역에서 발생된 규모 3.3의 지진 발생 전·후의 대기 중 라돈농도 변화량을 나타낸 것으로 지진이 발생되기 6일 전에 급격히 라돈농도가 증가하였다가 감소하는 큰 변화 폭을 나타냈으며, 지진 발생시까지 작은 변화 폭을 나타냈다. 이러한 결과를 통해 서울시(내륙지역) 대기 중 라돈농도 분포는 지진 발생 전 2일부터 6일 전까지 높은 라돈농도 및 큰 농도 변화 폭을 나타냈으며, 지진 발생시에는 낮은 라돈농도 및 작은 농도 변화폭을 나타내고 있는 것으로 조사되었다.

Fig. 15는 규모 3.0이상의 지진에 대해 동해시에 위치한 서울대학교 해양연구센터에서 관측된 대기 중 라돈농도의 변화량을 나타낸 것이다. Fig. a)는 2000년 4월 12일 격렬비열도 북서쪽 약 40 km 해역에서 발생된 규모 3.5의 지진 발생 전·후의 대기 중 라돈농도의 변화량을 나타낸 것으로 지진 발생 2일 전인 4월 10일까지 높은 라돈농도를 나타냈으며, 농도의 변화 폭 또한 큰 것으로 조사되었다. 그러나 지진 발생 2일 전부터 농도가 급격히 감소하여 지진이 발생된 후 까지 낮은 라돈농도분포 및 작은 라돈농도의 변화 폭을 나타냈다.

Fig. b)은 2000년 4월 29일 전북 군산 서쪽 약 90 km 해역에서 발생된 규모 3.3의 지진 발생 전·후의 대기 중 라돈농도의 변화량은 지진 발생 3일 전인 4월 25일에 급격히 라돈농도가 증가하였다가 급격히 감소하여 큰 라돈농도 변화량을 보였으며, 지진발생 하루 전부터 지진이 발생된 4월 28일까지 라돈농도가 급격히 감소하여 낮은 농도분포를 나타냈으며, 변화량 또한 매우 작게 나타났다. Fig. c)은 2000년 8월 21일 평양 남동쪽 약 20 km 지역에서 발생된 규모 3.4의 지진 발생 전·후의 대기 중 라돈농도의 변화량을 나타낸 것으로 지진 발생 4일 전인 8월 17일까지 급격한 라돈농도 변화를 나타냈으며, 17일 이후 라돈농도가 급격히 감소하였다. 또한 그 변화량이 매우 미비한 것으로 조사되었으며, 19일, 20일, 21일에 급격한 라돈농도의 변화를 나타냈다. Fig. d)는 2001년 1월 29일 전북 부안 서쪽 약 10 km 지역에서 발생된 규모 3.0의 지진 발생

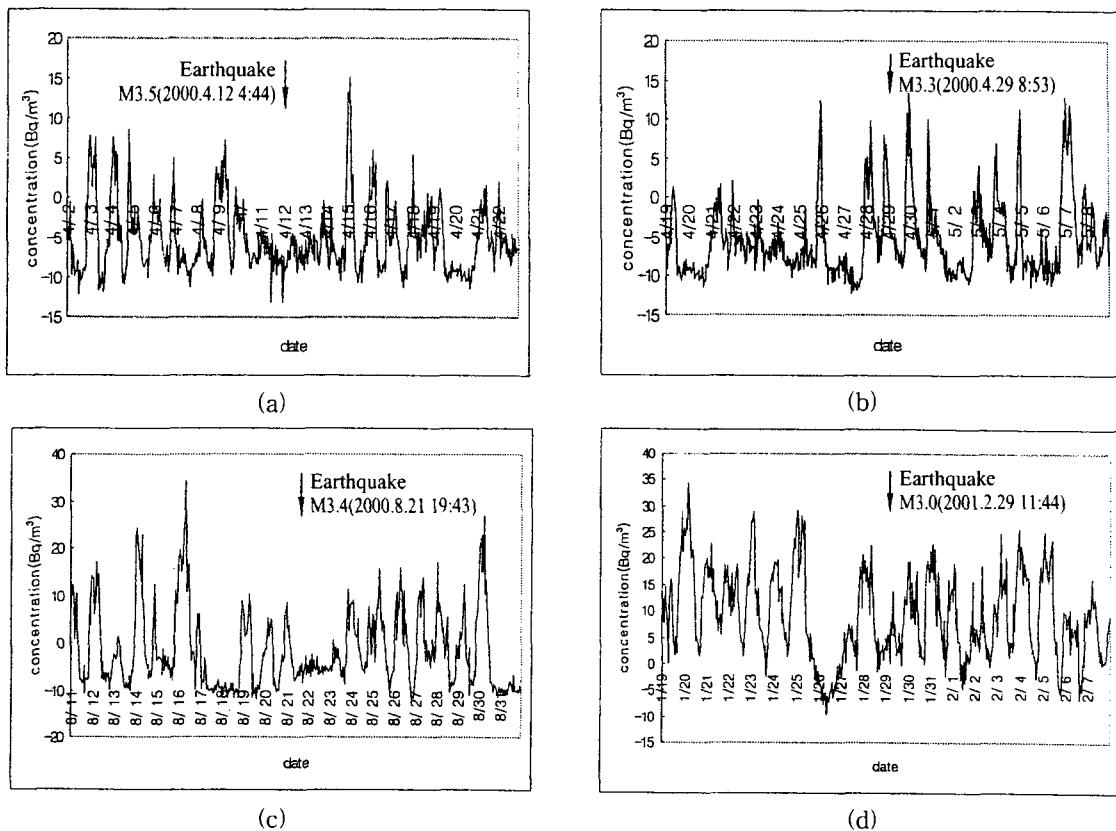


Fig. 15. Relationship between the earthquake occurrence and the distribution of radon in East Coast.

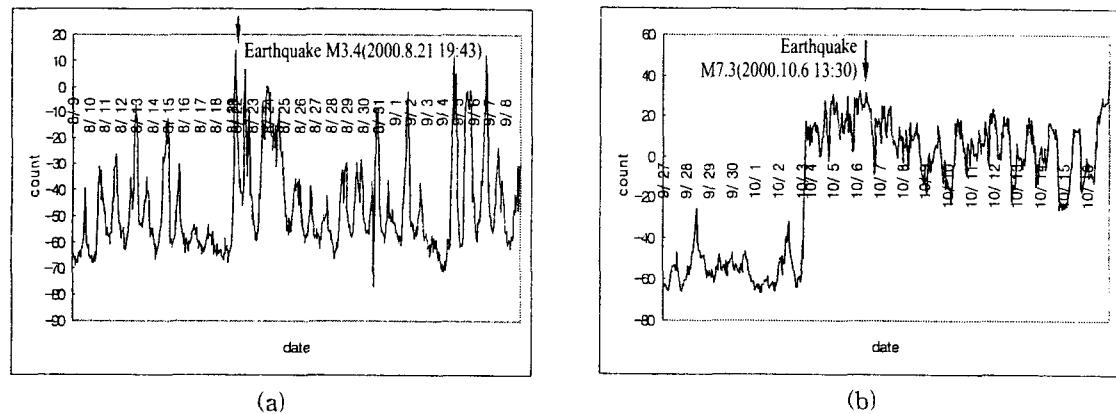


Fig. 16. Relationship between the earthquake occurrence and the distribution of radon in underground water.

전·후의 대기 중 라돈농도 변화량을 나타낸 그림으로 지진 발생 전·후의 대기 중 라돈농도는 매우 높은 것으로 나타났으며, 변화 폭 또한 큰 것으로 조사되었다. 그러나 특이할 만한 점은 지진 발생 3일 전인 26일 라돈농도가 급격히 감소한 것으로 조사되었다. 이러한 결과를 통해 동해시(해안지역) 대

기 중 라돈농도 분포는 지진 발생 2일전부터 4일 전까지 높은 라돈농도 및 큰 농도 변화폭을 나타냈으나, 지진 발생시나 지진 발생 하루 전에 매우 낮은 라돈농도분포 및 작은 라돈농도의 변화 폭을 나타내고 있는 것으로 조사되었다.

Fig. 16은 서라벌대학교 지하수에서 관측된 지하

라돈방사능농도의 측정을 통한 지진발생 예측에 관한 연구

수 중 라돈농도의 변화량을 나타낸 것으로 Fig. a) 은 2000년 8월 21일 평양 남동쪽 약 20 km 지역에서 발생된 규모 3.4 지진 발생 전·후의 지하수 중 라돈농도의 변화량은 지진이 발생되기 2일 전부터 라돈농도가 급증하는 것으로 나타났다. Fig. b)는 2000년 10월 6일 일본 톳토리현 서쪽 약 80 km 지역에서 발생된 규모 7.3 지진 발생 전·후의 지하수 중 라돈농도의 변화량을 나타낸 것으로 이 또한 지진이 발생되기 2일 전부터 라돈농도가 급증하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 통해 경주시 지하수 중 라돈농도 분포는 지진 발생 2일 전부터 라돈농도가 급증한 후, 높은 라돈농도분포가 일정기간 지속되어지고 있는 것으로 조사되었다.

4. 결 론

전세계적으로 지진활동이 활발한 여러 지역에서는 지진예측에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 국내에서는 지진발생 예측에 관한 연구가 아직 초기단계에 있으며, 라돈을 이용한 지진예측 연구는 전무한 상태이다. 이에 본 연구에서는 1999년부터 2001년 6월까지 대기(서울, 동해) 및 지하수(경주) 중 라돈농도의 연속관측을 통한 지진발생에 따른 라돈농도변화량의 특성을 조사하고 제시함으로써 향후 자연방사능 물질을 이용한 지진예측연구 분야의 활성화를 도모하는 한편 관련 기초연구자료를 제공하고자 하였다. 본 연구 결과 주요 내용은 다음과 같다.

- 1) 서울의 대기 중 라돈농도의 계절적 분포는 겨울 ($10.10 \pm 2.81 \text{ Bq/m}^3$), 가을($8.41 \pm 1.35 \text{ Bq/m}^3$), 여름($12.04 \pm 0.53 \text{ Bq/m}^3$), 봄($5.34 \pm 0.44 \text{ Bq/m}^3$)의 순으로 가을-겨울이 봄-여름에 비해 높은 농도를 나타냈으며, 동해의 계절적 분포는 가을($14.08 \pm 5.75 \text{ Bq/m}^3$), 여름($12.04 \pm 0.53 \text{ Bq/m}^3$), 겨울($12.02 \pm 1.40 \text{ Bq/m}^3$), 봄($8.93 \pm 0.91 \text{ Bq/m}^3$)의 순으로 나타나 여름-가을이 겨울-봄에 비해 높은 농도를 보이는 것으로 조사되었다.
- 2) 지하수 중 라돈농도의 계절적 분포는 봄($123.59 \pm 16.36 \text{ count/10min}$), 겨울($93.95 \pm 79.69 \text{ count/10min}$), 가을($68.96 \pm 37.53 \text{ count/10min}$), 여름($34.45 \pm 9.69 \text{ count/10min}$)의 순으로 높은 라돈변화량을 나타내고 있는 것으로 관측되었다.
- 3) 서울의 대기 중 라돈농도의 일일 시간별 농도의 범위는 $5.51 \sim 9.44 \text{ Bq/m}^3$ 으로 6시부터 9시 사이에 높은 농도분포를 나타낸 반면, 15시부터 19시 사이에 낮은 농도분포를 나타냈다. 또한 동해의 일일 시간별 농도의 범위는 $7.15 \sim 15.27 \text{ Bq/m}^3$ 으로 2시부터 6시 사이에 높은 농도분포를 나타

낸 반면, 13시부터 18시 사이에 낮은 농도분포를 나타냈다.

- 4) 서울(내륙지역) 대기 중 라돈농도분포와 지진발생과의 상관분석 결과 서울시 대기 중 라돈농도 분포는 지진발생 2일 전부터 6일전까지 높은 라돈농도 및 큰 농도 변화폭을 나타냈으며, 지진 발생시에는 낮은 라돈농도 및 작은 농도변화폭을 나타내고 있는 것으로 조사되었다. 또한 동해(해안지역) 대기 중 라돈농도분포와 지진발생과의 상관분석 결과는 지진 발생 전 2일부터 4일 전까지 높은 라돈농도 및 큰 농도변화폭을 나타냈으며, 지진 발생시나 지진발생하루 전에 매우 낮은 라돈농도분포 및 작은 라돈농도의 변화폭을 나타내고 있는 것으로 조사되었다.
 - 5) 지하수 중 라돈농도의 일일 시간별 농도의 범위는 $78.54 \sim 100.93 \text{ count/10min}$ 으로 오후 2시에서 가장 높은 농도를 나타냈으며, 오후 5시에 가장 낮은 농도를 나타냈다. 지하수 중 라돈농도분포와 지진발생과의 상관분석 결과 지진 발생 2일 전부터 라돈농도가 급증한 후 높은 라돈농도가 일정기간 지속되고 있는 것으로 조사되었다.
- 본 연구는 라돈을 이용한 지진발생 예측에 관한 연구로는 국내에서 처음으로 실시된 연구로서 천연방사능물질인 라돈의 대기 및 지하수 중 변화량이 지진예측에 관한 기초자료로 활용될 수 있음을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 “원자력기초연구사업(라돈방사능 농도의 측정을 통한 지진발생 예측에 관한 연구)”에 의해 지원·수행된 연구로 연구비를 지원하여 준 과학기술부에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 변진섭, 1998, 우리 알아야 할 지진, 경문사.
- 2) Fujimori, K., T. Yamamoto, S. Otsuka and H. Ishii, 1995, Observations of crustal movements and discharge at Rokko-Takao station-Change associated with the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Ann. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., 38, 287-296.
- 3) King, C. Y., N. Kozumi and Y. Kitagawa, 1995, Hydrogeochemical anomalies and the 1995 Kobe earthquake, Science, 269, 38-39.
- 4) Koizumi, N., Y. Kano, Y. Katagawa, T. Sato, M. Takaghashi, S. Nishinura and R. Nishida, 1996, Groundwater anomalies associated with

- the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, *J. Phys. Earth*, 44, 373-380.
- 5) Tsunogai, U. and H. Wakita, 1995, Precursory chemical changes in ground water : Kobe earthquake, Japan, *Science*, 269, 61-63.
- 6) Zhang, W. and X. Li, 1994, A survey of the hydrogeochemical observation network for earthquake prediction in China, *Earthquake research in China*, Edited by State Seismological Bureau, China, ALLERTON PRESS, ING/NEW YORK, 8(3), 337-386.
- 7) Igarashi, G., S. Saeki, N. Takahata, K. Sumikawa, S. Tasaka, M. Takahashi, and Y. Sano, 1995, Groundwater radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan, *Science*, 269, 38-39.
- 8) Noguchi, M. and H. Wakita, 1977, A method for continuous measurement of radon in groundwater for earth-quake prediction, *J. Geophys. Res.*, 42, 1353-1357.
- 9) Okabe, S., 1953, Time variation of the atmospheric radon content near the ground surface with relation to some geophysical phenomena, *Mem. Coll. Sci. Univ. Kyoto, Ser. A*, 28, 99,
- 10) 田阪茂樹, et al., 1994, 水中ラドン検出器の開発, *Radioisotopes*, 43, 125-133.
- 11) Iida, T., Y. Ikebe and K. Tojo, 1991, An Electrostatic Radon Monitor for Measurements of Environmental Radon, *Res. Lett. Atmos. Electr.*, 11, 55-59.
- 12) Dua, S. K., P. Kotrappa and P. C. Gupta, 1983, Influence of relative humidity on the charged fraction of decay products of radon and thoron, *Health Physics*, 45, 152.
- 13) Iida, T., Y. Ikebe, K. Suzuki, K. Ueno, Z. Wang and Y. Jin, 1996, Continuous measurements of outdoor radon concentrations at various locations in East Asia, *Environment International*, 22(1), S139-S147.
- 14) Iida, T., Y. Ikebe, K. Suzuki, K. Ueno, Z. Wang and Y. Jin, 1996, Continuous measurement of Outdoor Radon Concentrations at Various Locations in East Asia, *Environment International*, 22(1), 139-147.
- 15) Lee, K. H. and S. H. Na, 1983, A study of microearthquake activity of the yangsan fault, *J. Geol. Soc. Korea*, 19, 127-135.
- 16) 김재록, 1998, 알기쉬운방사선이야기, 한국원자력문화재단.
- 17) Sesana, L., E. Carpioli and G. M. Marcazzan, 2003, Long period study of outdoor radon concentration in Milan and correlation between its temporal variations and dispersion properties of atmosphere, *Journal of Environmental Radioactivity*, 65, 147-160.
- 18) Yoshioka, K., 1998, The vertical profile of ^{222}Rn concentration in the lower atmospheric boundary layer at Shimane peninsula, in *Radon and Thoron in the Human Environment*, World Scientific publishing, Tokyo.
- 19) Yoshioka, K. and T. Iida, The diurnal change in the vertical distribution of atmospheric ^{222}Rn due to growth and rise of the stable stratification height, *Environmental International*, in press.
- 20) 서울특별시 도시철도공사, 1999, 지하철 라돈농도 오염원 측정 및 저감방안 연구.