

## 제주 동굴의 라돈농도 측정

고상혁, 김형석, 정범진

제주대학교 에너지공학과

### Measurements of Radon Concentrations at Caves in Jeju

Sang-Hyuk Ko, Hyung-Seok Kim and Bum-Jin Chung

Department of Nuclear and Energy Engineering,  
Cheju National University

#### ABSTRACT

Radon is a radioactive gas emitting  $\alpha$  particles. It is chemically stable due to its inert characteristic. While its daughter products,  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  and  $^{214}\text{Po}$ , attached with aerosol particles, is known to cause lung cancer. As radon is produced from uranium and thorium, it accumulates in poorly ventilative underground voids such as caves and mine. Radon concentrations at caves in Jeju were measured in this study. The measurements were made by setting three CR-39 detectors for 70 days at 2~4 positions in Manjang, Hyupjae and Ssangyong caves. The radon levels of the caves spread 403.1~606.7Bq/m<sup>3</sup>. With these results, it is concluded that the Jeju caves have 6 times higher radon concentrations than ordinary house of 65.3 Bq/m<sup>3</sup> and that they are higher than Seoul subway stations due to poor ventilation. While, the caves in Jeju have lower radon concentrations than limestone caves of Robin Hood. The radon concentration in the middle of Manjang cave is slightly higher than the action level in the work place of 500Bq/m<sup>3</sup> suggested by the ICRP. The measurement errors are estimated to be less than 5% from its calibration factor.

## 1. 서 론

인간은 살아가는 동안 우주선, 지각 또는 인체 내에서 방출되는 자연방사선에 항상 노출되어 있다. 일인당 연간 자연방사선 피폭량은 2.4mSv로 평가되고 있으며 이 가운데 라돈의 기여도가 50% 이상을 차지한다. 주요한 피폭경로로 호흡을 통해 라돈을 체내로 흡입할 경우 장기적으로 폐암이 유발될 수 있다[NCRP (1987) ; Khalid et al., (1997)].

미국 환경보호청(US EPA)의 발표에 따르면, 주택과 건물에서 발생된 라돈과 자손의 흡입으로 인한 폐암 사망자의 수는 광부들의 역학조사를 통해 얻어낸 선형무발단치 개념의 위해예측모델에 적용하였을 때 연간 7,000~30,000명에 이르는 것으로 알려져 있다[US EPA (1987)]. 특히 암역학 자료에서 위암이 감소하는 경향임에 반해 폐암은 증가하고 있어서 공기 중 라돈농도문제를 다시 생각하게끔 한다. 더욱이 라돈에 의한 방사선 피폭이 흡연 등과 같은 다른 암요인과 상승작용을 할 수 있다고 가정한다면 라돈문제의 중요성은 더욱 강조된다.

미국, 영국, 스웨덴 등 세계 여러 나라에서는 이미 고체비검출기를 이용하여 자국내 라돈농도의 준위도를 마련하고 저감대책을 강구하고 있다. 그러나 국내의 경우 라돈과 관련한 법적규제가 미비하고 이에 관한 연구가 일부 대학이나 연구소에 일부 수행중이다. 또한 라돈에 관한 홍보가 부족한 실정이어서 뜬금없는 라돈에 관한 보도들이 국민에게 무조건적인 두려움만 가중시키고 있다. 이러한 라돈문제는 환기시설이 취약한 지하시설에서 일반적으로 높게 나온다. 몇 해 전에는 서울시 지하철역사내의 라돈수치가 높다하여 국민에게 불안감을 주었는데 그 이후의 연구조사에 따르면 크게 염려가 없는 것으로 밝혀져 화제가 된 바 있다. 또한, 음용수 내의 라돈수치가 높다는 보도로 인해 이에 따른 법적규제의 마련이 시급함이 보도된 바도 있다. 본 연구는 현재 관광지로 개발되어 사람의 왕래가 잦은 제주의 동굴 3곳을 선정하여 이에 대한 평균라돈농도를 측정함으로써 제주지역의 방사능환경에 대한 기초 자료를 생산코자 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2-1. 라돈

폐암의 한 원인으로 지목받는 라돈은 지각을 구성하는

암석이나 토양 중에 천연적으로 존재하는 우라늄( $^{238}\text{U}$ )과 토륨( $^{232}\text{Th}$ )이 Fig 1과 같이 몇 단계의 방사성붕괴를 거친 후 생성되는 무색, 무미, 무취의 방사능을 띤 불활성 기체이다. 일명 토론이라고 부르는  $^{220}\text{Rn}$ 은 라돈( $^{222}\text{Rn}$ )과 동위원소 관계에 있으나 반감기가 짧아 지하에서 생성된 토론이 지표 공기 중으로 방출되는 양은  $^{222}\text{Rn}$ 에 비해 매우 적으므로 통상적으로 라돈은  $^{222}\text{Rn}$ 을 지칭한다.

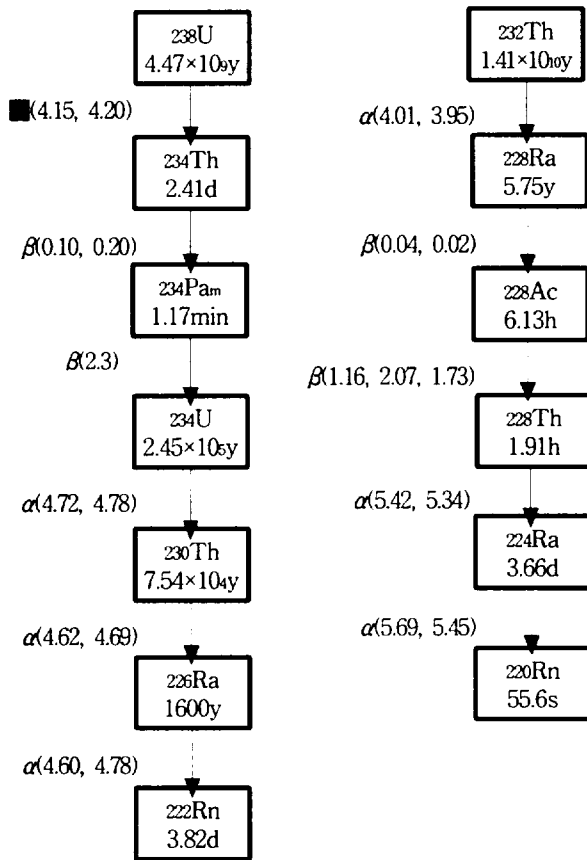


Fig. 1. Chain decay of  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$ . ( ) means the highest energy of  $\alpha$  or  $\beta$  particle(MeV).

지각에서 생성된 라돈은 암석이나 토양의 틈새에 존재하다가 확산 또는 압력구배에 의해 지표 공기 중으로 방출되며 그 방출량은 암석 및 토양 중에 포함된 우라늄의 양에 따라 지역적으로 상당한 차이를 나타낸다. 일반적으로 옥외환경에서 보다 환기의 정도가 낮은 주택 및 건물 내에서 라돈의 축적으로 인해 라돈의 농도가 대개 수십 배, 내지 수백 배 이상 높게 나타난다. Fig 2와 같이 라돈은 건축자재, 상수, 취사용 천연가스 등을 통해서 실내로 들어오지만 약 85% 이상은 지각으로부터 방출된다

[Turk et al., (1987)].

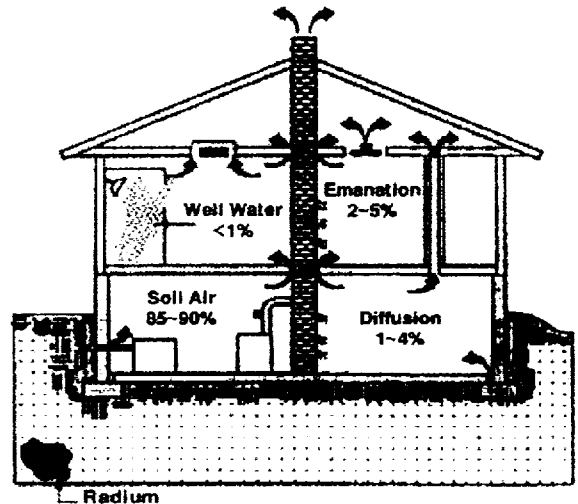


Fig. 2. Radon's main infiltration path to building.

2-2. 라돈에 의한 폐암 발생 메카니즘

라돈 흡입에 따른 폐암의 유발에 대한 증거는 주로 높은 준위의 라돈에 피폭한 지하 광부 특히 우라늄 광부에 대한 역학조사에 근거를 두고 있다[BEIR IV (1988) ; UNSCEAR (1988) ; IARC (1988) ; ICRP (1990)]. 1980년대에 들어서 일반 주택에서 라돈농도가 높은 곳이 발견됨에 따라 자연적으로 발생하는 라돈으로 인한 잠재적 공중보건문제가 주요한 관심이 되었다. 이에 여러 선진국에서는 자국국토에 대한 라돈농도 실태를 파악하고 있으며 미국 환경보호청(US EPA)에서는 주택내 라돈농도의 조치준위로서  $148\text{Bq/m}^3$ 를 권고하고 있다.

라돈은 3.8일의 반감기를 가지고 그림 3과 같이 안정한  $^{206}\text{Pb}$ 에 도달할 때까지 연쇄적인 붕괴를 거치면서 짧은 반감기를 지닌 입자상의 라돈자손( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$  등)을 생성한다. 이때 라돈은 화학적으로 불활성 기체이고 전하를 띠지 않으므로 라돈이 폐로 흡입되더라도 호흡을 통해 다시 밖으로 방출된다. 특히 라돈은 그 자손들에 비하여 상대적으로 긴 반감기를 지니기 때문에 폐에 머무르는 동안 붕괴하여 알파입자의 에너지를 폐 세포에 부여할 확률은 극히 낮다. 이에 반해 라돈자손은 정전기적인 전하를 띠므로 공기 중의 먼지 및 수증기 등과 흡착하거나 물체의 표면에 흡착하게 된다. 이러한 라돈자손을 흡입하게 되면 라돈자손은 반감기보다 충분히 긴 시간동안 폐에 흡착하여 붕괴함에 따라 Fig 4와

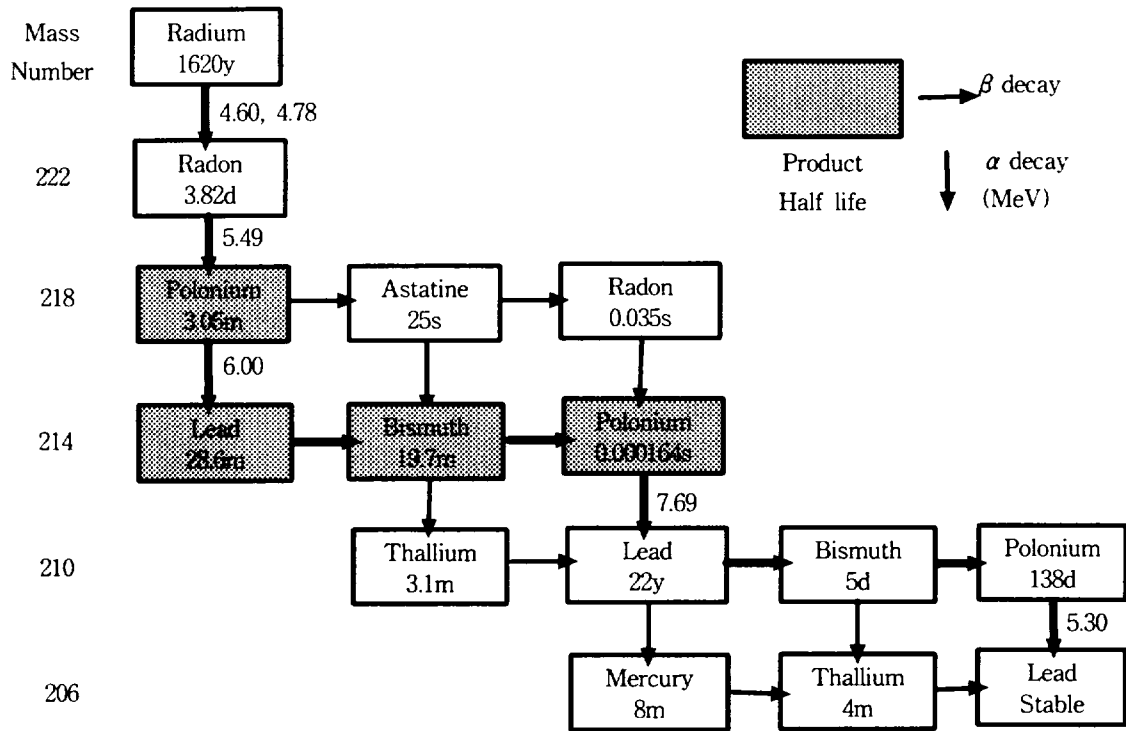


Fig. 3. Drawing of radon's chain decay. Most decays occur according to bold arrows.

같이 폐세포, 특히 DNA 분자에 에너지를 부여함으로써 세포의 사멸이나 돌연변이를 초래할 수 있다. 이러한 원인으로 손상된 DNA는 거의 전부가 탁월한 복구체계에 의해 회복되지만 복구의 실수, 복구 이전의 복제, 또는 복구불능 등의 이유로 인해 손상이 영구화되어 장기적으로 폐암을 유발할 수 있다[BEIR IV(1988) ; ICRP (1987)]. 따라서 라돈에 의한 폐암의 위험을 언급할 때 라돈 그 자체로 인한 피폭이라기보다는 라돈자손에 의한 피폭으로 본다.

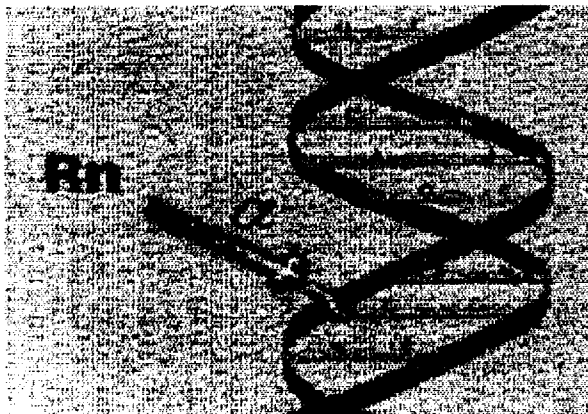


Fig. 4. DNA damage by  $\alpha$  emitting from radon.

### 2-3. 서울 지하철 역사와 Creswell Crags 석회암동굴의 라돈농도

라돈은 토양 및 지각 내에서 기체상으로 존재하다가 지각내의 압력과 대기와의 압력구배로 인한 확산이 일어나 일반 환경으로 방출된다. 또한 암석이나 지각내의 Crack, fissure, fracture의 존재는 라돈의 이동 및 발산에 중요한 요인으로 작용하여 암체에서의 단층이 존재할 경우는 라돈의 농도를 매우 증가시킨다. 이로 인해 지하철 역사라든가 광산의 갱내, 그리고 동굴과 같은 지하공간에서 라돈은 인체에 유해하게 작용할 것으로 기대된다. 이에 오늘날 도시인들의 대표적인 생활공간으로 자리 잡고 있는 지하철 역사와 사람의 왕래가 잦은 관광동굴로서 영국 더비셔 지방의 접견지대에 있는 Creswell Crags 동굴계 중 하나인 로빈 훗 동굴에서의 라돈수치와 그에 영향을 미치는 인자를 살펴보았다.

서울시 지하철 역사내의 라돈농도는 이철민 등에 의해 측정된 바 있다[이철민 등(1999)]. 측정에 있어서 선정대상지역은 특정 오염물질의 배출농도가 높거나 초과우려 가능성이 예측되는 지하철 역사를 표본 역사에 포함시키고 환승역 등 지하철 승객이용도가 높은 역이 우선적으로 선정되도록 하여 단기간과 장기간으로 라돈농도를 측정하였다. 또한 수중의 라돈(370Bq/m<sup>3</sup>)이 대기 중의 라돈

농도(37Bq/m<sup>3</sup>)를 증가시킨다는 연구보고에 따라[Gessel et al.(1980)] 지하철 역사 지하수층의 라돈농도의 측정도 이와 동시에 이루어졌다. 이에 따라 총 17개 역사의 승강장, 대합실, 역무실 및 외기에서 측정된 공기 중 장기라돈농도는 18~192.4Bq/m<sup>3</sup>으로 전체 라돈의 평균농도는 50.4Bq/m<sup>3</sup>로 조사되었다. 이는 ICRP가 권고하는 조치준위(Table 1)에 못 미치는 수준으로 커다란 위해는 없을 것으로 보인다.

Table 1. ICRP's action levels for radon concentration.

	Parameter	Action level
ICRP	Effective dose	Yearly 3~10mSv
	House	200~600 Bq/m <sup>3</sup>
	Working place	500~1500 Bq/m <sup>3</sup>

또한 이러한 수치는 우리가 우려하던 기대치보다는 낮은 수치를 나타내는데 이는 지하철 역사내의 환기시설에 의해 라돈농도가 현저하게 감소한 것으로 평가된다. 그리고 지하철 역사내 라돈농도에 영향을 미치는 또 다른 인자는 풍속 및 기압의 변동으로, 열차의 운행에 따른 풍속 및 기압의 변화(감압)로 인해 공기의 분자운동 및 대류운동을 증가시켜서 역사 내 토양 및 건축구조물에서 방출되는 라돈의 양을 증가시킨 것으로 나타난다.

영국 Creswell Crags 협곡은 백운암질의 저 마그네슘 석회암 일대에 자리잡고 있는데 여기에는 동굴들이 모여 석회암질의 동굴계를 형성하고 있다. 특히 사람의 왕래가

많고 가장 큰 동굴인 로빈 훗 동굴은 4개의 주된 공간과 터널로 연계된 복잡한 구조를 갖는다. (Fig 5) 그리하여, 로빈 동굴 내에 CR-39의 고체비적검출기로써 4~8월까지의 장기라돈농도를 구한 결과, 31~3187Bq/m<sup>3</sup>까지 다양한 분포를 보인다. 여기서, 입구에서 22m 떨어진 지점까지는 100Bq/m<sup>3</sup>미만의 라돈수치를 보이거나 그 이상 지점에서는 465, 780, 3187Bq/m<sup>3</sup>등의 높은 라돈수치를 보이고 있다[Gillmore et al. (2001)].

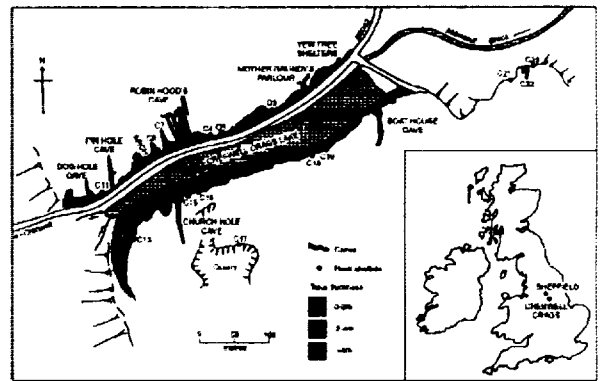


Fig. 5 Creswell Crags limestone cave system.

또한, 라돈 순간계측기(Radhome P device)로 측정된 최고 라돈 농도는 7800Bq/m<sup>3</sup>까지 기록함으로써 그 심각성을 나타내었다. 이로써 위치에 따른 라돈농도를 도시한 결과, 낮은 라돈농도를 기록하는 지점은 입구나 환기 갭에 가까워 환기가 잘 되는 지점으로 나타난다. 반면에, 높은 라돈수치는 공기유동이 거의 없는 폐쇄공간에서 주로 나타났다. 이렇듯 환기는 지하공간에서 라돈농도를 저감시키는 중요한 요소임을 재확인 시켜준다. 또한 석회암

Table 2. Uranium content in all sort of rock.

Rock	U content (ppm)	Rock	U content (ppm)
Granites	4.0	Sandstones	2.2
Granodiorites	2.6	Shales	3.7
Acid igneous rocks	3.0	Cordradite meteorites	0.014
Neutral igneous rocks	1.5	Any other Sedimentary rocks	1.2
Basic igneous rocks	0.6	Phosphorites(Florida, USA)	120
Ultramafic igneous rocks	0.03	Phosphorites(north Africa)	20-30
Limestones	1.3	Black shales(Alum shale, Sweden)	168
Basalts	0.8	Black shales(Tennessee, USA)	50-80
Andesites	2	Black shales(Okcheon, south Korea)	294

은 지하수가 절리와 틈새를 통해 흐르게 하는 중요한 대수층으로 석회암은 암석 내 우라늄함량[Alloway (1995) ; Brownlow (1996)]이 적어 높은 라돈농도를 갖지 않을 것이라고 예상 되지만, 동굴처럼 제약된 지형에서 투수성과 같은 기반암의 특성이 라돈농도에 주요한 영향을 미치는 원인이 됨을 알 수 있다[Waltham (1991)].

2-4. 제주의 동굴

제주도는 화산활동에 의해 형성되었으므로 주로 현무암으로 구성되어 있다. 연구 대상동굴인 만장굴, 협재굴, 쌍용굴 역시 현무암이 분출하여 흐르다가 그 표면부가 고화된 후에 아래의 미고결 액체 용암이 빠져나가 생성된 용암동굴이다.

해발 100m 내외의 구릉지대에 분포하는 만장굴은 천연기념물 제98호로 널리 알려진 대표적인 동굴로 그 규모는 세계적으로 제일 큰 것으로 알려져 있다. 본 동굴의 형성구조는 2층굴로 다층구조를 이루고 있는데 이는 용암이 같은 시대에 여러번 분출하였음을 의미한다. 이렇게 용암 분출로 형성된 만장굴은 그 기반암이 침상장석 현무암(표선리현무암)으로 이 암석은 점성이 약하고 유동량이 막대하여 동굴 형성에는 적합한 용암의 특성을 지니고 있다. 용암 유출시의 표면은 매우 평탄하고 완만한 경사 지형을 이루고 있는데 이러한 현상은 이 동굴의 하류부로 갈수록 유류하는 현상을 나타내어 용암동굴의 주구조를 이해하는 데 매우 중대한 역할을 한다. 또한 동굴 벽면에 용암 유출량이 점차 감소하면서 형성되는 용암조흔이 남아 있어서 유출량의 변화를 엿볼 수 있게 한다. 만장굴 총길이는 7,270m이고 내부의 폭은 5~10m이며 높이는 3~20m에 이르는 대규모의 웅장한 용암동굴로서 주변의 김녕사굴, 발굴, 개우셋굴 등의 이웃한 동굴계와 합치면 총연장 13,422m로 용암동굴계에서는 세계에서 가장 긴 것으로 공인하고 있다. 연중 내부기온은 10~14℃로 낮고, 습도는 85~100%로서 비교적 높아 저온다습한

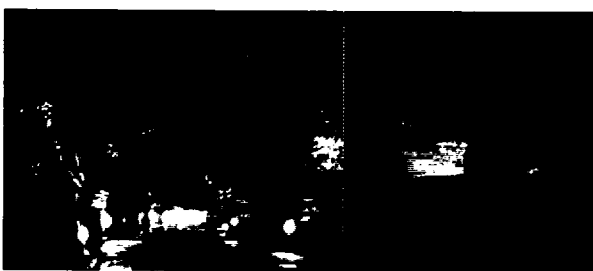


Fig 6. Inside of Manjang cave.

환경을 이루고 있다.

한림읍 한림공원내에 있는 협재굴과 쌍용굴은 천연기념물 제236호로 지정되어 있다. 이는 약 250만년 전에 한라산 일대 화산이 폭발하면서 생긴 용암동굴로 조개가루가 빗물에 용해되어 용암석 틈새로 석회수가 스며든다. 이러한 석회수침투는 동굴천장에 신기한 모양의 석회 종유석을 만들고 있고 천장의 절리를 따라 종유관을 생성하며 바닥에 석순을 솟게 한다. 이렇게 협재굴과 쌍용굴과 같은 용암동굴이 유사 석회암 동굴로 변하고 있는 것은 지질학상 매우 특이한 경우로, 이러한 2차원 동굴은 전 세계 이 곳뿐이며 페루의 돌소금동굴, 유고의 해중종유굴과 함께 3대 불가사이한 동굴의 하나로 동굴학계의 비상한 관심을 모으고 있다. 이 동굴 일대에는 모래와 조개껍질, 전복껍질 등의 패류화석이 섞인 패사층을 이루는데 이로 미루어 볼 때 동굴의 형성 당시에는 이 지역이 바다였다고 추정한다. 협재굴과 쌍용굴, 소천굴, 황금굴 등, 20여개의 동굴이 하나의 시스템으로 형성되어 있고 그 길이는 1만7천 미터로 알려져 왔으나, 최근 조사에 의하면 4.2km를 웃도는 것으로 밝혀졌다. 협재굴 길이는 약 100m, 높이 5m, 너비 10m이고 쌍용굴은 길이 400m, 높이 3m, 폭 6m이다. 이 쌍용굴은 용암이 흘러서 동, 서 두갈래로 나뉘어진 물굽이를 볼 수 있는데 마치 용 두마리가 굴 내부에 있다가 빠져나간 듯한 형체 때문에 이름이 유래되었다. 이들 동굴 내부 온도는 만장굴과 마찬가지로 사시사철 17~18℃로 일정하고 습도도 높게 유지된다.



Fig 7. Inside of Hyupjae and Ssangyong caves.

2-5. 제주 동굴내 라돈 상관인자

서울 지하철 역사내의 라돈농도에 영향을 끼치는 것은 열차 운행에 따른 압력변화, 환기시설, 지하수 내의 라돈농도이다. 영국 Creswell Crags 석회암 동굴내의 라돈농도는 환기와 기반암 특성이 주요한 영향을 끼친 것으로

보인다. 이렇게 지질 환경에서 라돈농도를 지배하는 요인은 암석 및 토양내의 우라늄함량, 그리고 토양 및 암석에서 입도 및 함수율, 단층대의 형성, 지각의 틈새, 기공, 투수율, 온도, 습도, 기압 등의 기후변화나 기상조건 그리고 환기 등이다. 그러나 본 연구의 선정 동굴 내의 온도나 습도는 연중 일정하여 최소한 검출기 설치기간동안에는 외기 환경에 크게 영향을 받는 다고는 볼 수 없다. 즉, 동굴은 계절에 따라 혹은 밖의 기후나 기류 변화에 따른 라돈농도에 큰 변화를 미치지 않을 것으로 보여진다. 이로써 선정 동굴 내 라돈에 영향을 미치는 인자로는 동굴을 구성하는 기반암의 틈새나 기공, 투수율 및 함수율 등과 같은 기반암의 특성, 지하수 내의 라돈 수치, 그리고 환기 정도가 동굴 내 라돈농도의 주요한 인자로 간주된다.

2-6. 고체 비적검출기를 이용한 라돈측정 시스템

검출기홀더 내에서 라돈과 라돈자손의 붕괴로 방출되는 알파입자는 방출된 위치에서의 초기에너지로부터 연속적인 에너지 스펙트럼을 지닌다. 이들 알파입자가 검출기로 입사하면 검출기에는 알파입자의 궤적을 따라 잠재적으로 반연속적인 손상(Quasi-continuous trails of damage)이 생기고 궤적의 끝부분으로 갈수록 전리밀도(Ionization density)가 높아짐에 따라서 손상의 정도는 커진다. 즉, 알파입자의 궤적에 따른 손상의 정도는 브레그 피크(Bragg peak)와 유사한 모양을 지닌다. 이러한 잠재비적(Latent track)의 직경은 수십 nm에 지나지 않는다.

라돈에 노출된 검출기가 NaOH 또는 KOH 등과 같은 에칭용액을 담은 항은 수조에 일정시간동안 담구어지면 검출기의 표면이 표면에칭율(Bulk-etch rate;  $V_B$ )로 제거됨과 동시에 화학적으로 활성을 띤 손상부위는 비적에

칭율(Track-etch rate;  $V_T$ )를 가지고 에칭된다. 따라서 비적에 따른 에칭율( $V_T$ )이 표면제거에 따른 에칭율( $V_B$ )보다 클 때 비적은 확대되어 그 직경이 광학현미경으로 관찰할 수 있을 정도인 수  $\mu\text{m}$  이상에 이르게 된다. Fig 8은 검출기 표면에 수직으로 입사되는 알파입자에 의해 생성된 비적의 에칭과정에서 나타나는 기하학적 모양을 보여준다. 여기서  $R$ 은 입자의 비적,  $d$ 는 에칭된 비적의 직경,  $L$ 은 에칭된 비적의 길이 그리고  $t$ 는 에칭시간이다.

화학적 에칭을 통해 확대된 비적은 CR-39의 투명성으로 인해 가장 손쉬운 계수장치인 광학현미경을 통해 관찰된다. 또한 광학현미경에 CCD(Charged coupled device) TV카메라를 부착하여 포착된 영상을 개인용 컴퓨터의 내장형 영상처리기로 전송하는 계수시스템을 이용하여 CR-39 표면에서 원형 또는 타원형을 이루면서 손상부위를 따라 원뿔모양의 기하학적 형태를 띠는 비적과 자연적이거나 인위적으로 생성된 흠집들과 쉽게 구분할 수 있다.

3. 연구내용 고찰 및 결과

3-1. 검출 시스템의 구성

라돈 측정에는 순간측정방식, 연속측정방식, 토양가스를 채취하여 측정하는 방법 등이 있으나 여기서는 장기간 동굴내 라돈의 평균농도측정을 위해 크기가 작고 가격이 저렴해야 하며 처리와 판독의 용이성, 민감도, 투명도, 재현성, 습기가 많은 환경에서의 안정성 등의 요건을 만족하고 장시간의 에칭과정에서 과도한 표면제거가 이루어지지 않아야 하기 때문에 화학적 에칭만으로 라돈을 포함하여 라돈자손의 모든 에너지를 기록할 수 있는 장점을 지닌 CR-39를 선택하였다.

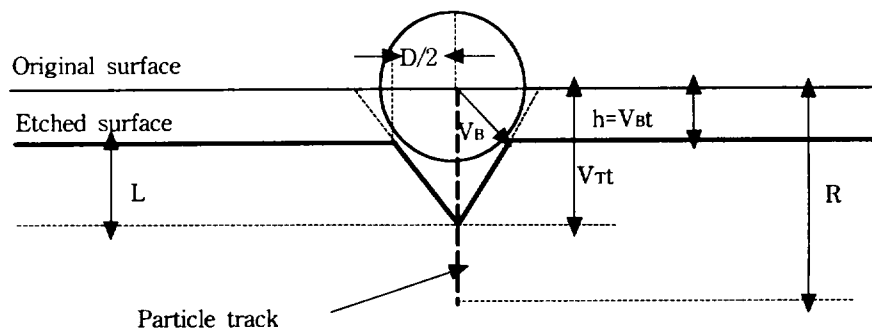


Fig 8. Track's geometrical form appeared in processing of detector etch.

검출기 홀더는 Polypropylene base에 10%의 Carbon black을 첨가하여 도전성을 약  $10^3 \Omega$ 으로 향상한 소재를 사용함으로써 홀더 내에서 생성된 라돈자손이나 방출된 알파입자가 정전기의 영향을 받지 않도록 하였으며 라돈의 유효체적과 라돈자손의 유효면적, 라돈과 라돈자손의 비정 및 검출영역과의 입계각을 고려하여 반경이 2.2cm, 높이가 3.2cm인 실린더 형태로 구성되었다[김등 (2000)]. 홀더의 벽에 흡착한 라돈자손에서 방출되는 알파입자는 검출기에 대하여 에너지에 따른 입사 입계각과 함께 상대적으로 평탄한 입사각을 지니므로 알파입자가 검출기에 비적을 생성하는 것은 확실적인 사상이다. 따라서 검출기에서 생성된 알파입자의 비적수는 Fig 8과 같이 검출기의 중심부에서 최대를 나타내고 중심에서 멀어짐에 따라 점차 감소한다[Urban et al. (1981) ; Domanski et al. (1984) ; Frank et al. (1973)]. 따라서 홀더 내에서 검출기의 위치가 변하거나 비적계수를 위해 선택하는 면적이 달라지면 표준편차의 추정범위보다 큰 계수오차를 기록할 수 있으므로 조임쇠를 이용하여 검출기를 고정시키는 것은 중요하다.

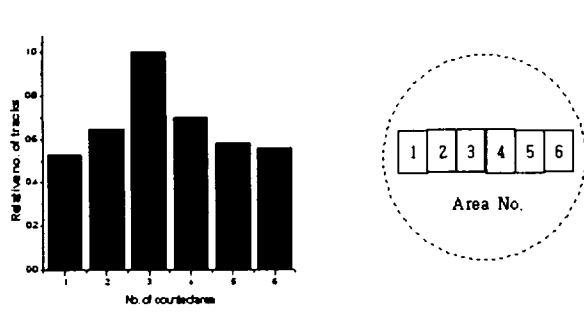


Fig 9. Distribution of  $\alpha$  particle tracks detected by CR-39 film area of 8.5 mm<sup>2</sup>.

확산필터는 공기 중의 먼지입자, 에어로졸 그리고 라돈자손으로부터 라돈가스를 분리하는데 사용되며 일정시

간이 지나면 홀더 안과 밖의 라돈은 평형을 이루게 된다. 여러 종류의 필터에 대한 확산계수와 필터의 두께에 따른 확산시간을 평가하기 위한 연구가 수행되었으며 이들 데이터는 실내에서 라돈농도의 단시간 변화를 반영하고 토론의 짧은 반감기를 이용한 라돈과 토론의 구분에 유용하게 사용된다[Urban et al. (1981) ; Khan et al. (1993) ; Espinosa et al. (1991)]. Table 3에서와 같이 홀더 내부의 라돈농도의 시간반응특성과 검출기의 민감도, 즉 실내에서 라돈농도의 단시간 변화를 반영하고 토론의 짧은 반감기를 이용한 라돈과 토론의 구분에 유용하므로 0.5mm 두께의 Fibreglass필터(상품명: Whatman GF/C)를 검출기 홀더에 장착할 필터로 선정하였다.

Fig 10는 위의 언급된 인자와 더불어 많은 참고문헌과 홀더의 재료 및 체적등과 같은 검출효율에 영향을 미치는 인자들을 고려하여 설계된 검출기이다.

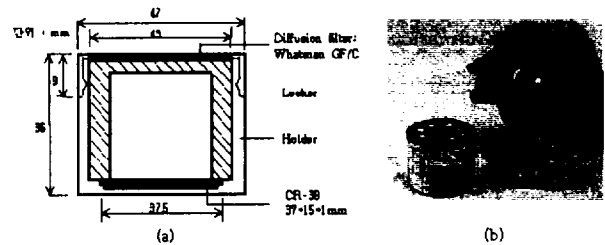


Fig 10. Design of detector system(a) and holder equipped with detector and filter(b).

### 3-2. 제주 동굴의 라돈농도 측정

라돈 농도 측정대상 동굴은 관광자원으로 개발되어 사람의 왕래가 잦은 동굴 3곳을 선정하였다; 만장굴, 쌍용굴, 협재굴. 선정 동굴 내의 장기간 라돈농도를 측정하기 위해 동굴별로 2~4개 지점에 고체비적검출기(CR-39)를 각각 3개씩 70일간(2003년 6월 16일~동년 8월 25일) 설치하였다. 만장굴의 경우 일반인에게 관광이 허용된 곳인

Table 3. Diffusion coefficient and time about various material filters.

Eilters	Diffusion coefficient ( $10^{10} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ )	Foil thickness (mm)	Concentration ratio $C_{in} / C_{out}^*$		Diffusion time
			<sup>222</sup> Rn	<sup>220</sup> Rn	
Ploycarbonate	3	0.14	0.31	0	180 h
Ployethylene	335	0.10	0.93	$2.2 \times 10^{-3}$	50 min
Fibreglass filter	45000	0.50	0.96	0.072	56 sec

\* : Concentration ratio at steady state condition calculated.

1km 구간에 대해 입구지점, 중간지점, 1km지점까지 3군데에 설치되었고, 협재굴은 입구와 출구 2개 지점에, 쌍용굴은 2개의 굴이 연이어 있는 동굴로서 4개 지점에 설치되었다. 검출기는 물이 고여있는 지점을 피하고 동굴 내의 바위 턱을 따라 지표에서 1m 높이에 설치하였다. 그리고 비교의 목적으로 같은 기간동안에 일반 가옥 3개 지점에서 검출기가 설치되었다. 측정후, 검출기를 회수한 다음 CR-39필름을 70℃, 6N의 NaOH 용액에서 7시간 동안 에칭(Etching)시킨 후에 흐르는 물에 세척하여 광학현미경으로 단위 면적당 비적의 수를 카운트한다. 이렇게 구해진 비적의 수를 교정인자(Calibration factor)에 곱하여 동굴내의 라돈농도를 계산한다. 교정인자(Calibration factor)는  $9.59 \pm 0.49(\text{Bq/m}^3) / (\#/d \cdot \text{cm}^2)$ 으로 라돈농도 표준 오차는 5%내외로 산출된다.

3-3. 측정결과 및 분석

Table 4에서 제시한 바와 같이 제주 용암동굴의 라돈농도의 측정결과는 403.08~606.7Bq/m<sup>3</sup>의 분포를 보여준다.

제주의 동굴의 경우 동굴 입구 근처에 설치된 지점에서 400Bq/m<sup>3</sup>이 넘는 높은 라돈 수치를 보여준다. 이는 석회암동굴의 입구 20m 내의 지점에서는 라돈농도가 밖의 대기와 거의 차이가 없다는 것으로 보고된 다른 연구의 경우와 다르다[Hyland (1995)]. 이는 전술한 석회암동굴이 지상에 입구를 두고 있는 반면, 본 연구의 선정 동굴은 지하에 위치(만장굴은 지표에서 약 20m 지하에 위치한다.)하는데 라돈의 반감기와 질량수를 고려하면 라돈의 최대이동거리는 최대 수 m로 이는 라돈 확산에 의해 외기로 빠져나가는데 제약을 갖는다. 또한 선정 동굴들은 연중, 계절에 상관없이 거의 일정한 온도를 유지하고 여름철 경우에 동굴 안과 밖의 온도가 10℃ 정도 차이를 보이므로 외기와의 기류 교환이 거의 없음으로 풀이 된다. 즉, 제주 동굴의 경우 입구 부근에서의 라돈수치는 입구 출현에 의한 환기의 영향을 별로 받지 못한다는 것이다. 반대로 영국 Creswell Crags의 석회암동굴의 입구 근처에 위치한 지점의 라돈농도는 대기 중의 것과 비슷하고 서울 지하철 역사내의 평균라돈농도도 환기시설에 의해 낮은 농도를 보인다. 만장굴 550m 지점의 라돈농도는 점 두치를 기록한다. 이 지점에 있어서 다른 지점과 달리 동굴 벽면과 천장에서 많은 기공과 틈새가 있었는데, 이는 기저지만 내의 라돈이 방출하는데 통로 역할을 하여 다른 지점보다 높은 수치를 나타내고 있음이다. 실제 이 지

점에서 동굴 벽면의 금이 생긴 것을 막은 공사가 있었고 많은 지하수가 고여 있어서 라돈농도의 상승요인으로 작용한 것으로 판단된다.

Table 4. Radon concentrations at the caves and ordinary house.

Cave	Position no.	No. of track	#/d*cm <sup>2</sup>	Mean	Net	Bq/m <sup>3</sup>	Distance (m)		
Manjang cave	MA-1	448	64.4122	52.6704	51.47	493.62	10		
	MA-2	266	38.2448						
	MA-3	385	55.3543						
	Manjang cave	MB-1	488	70.1633	64.4602	63.26	606.68	550	
		MB-2	419	60.2427					
		MB-3	438	62.9745					
	Manjang cave	MC-1	313	45.0023	45.3857	44.19	423.76	1000	
		MC-2	313	45.0023					
		MC-3	321	46.1525					
Hyupjae cave	CA-1	269	38.6761	46.7276	45.53	436.63	20		
	CA-2	335	48.1654						
	CA-3	371	53.3414						
	Hyupjae cave	CB-1	313	45.0023	43.229	42.03	403.08	18	
		CB-2	296	42.5581					
		CB-3	293	42.1268					
Ssangyong cave	DA-1	412	59.2363	48.9322	47.73	457.77	5		
	DA-2	278	39.9701						
	DA-3	331	47.5903						
	Ssangyong cave	DB-1	317	45.5774	46.3921	45.19	433.41	170	
		DB-2	353	50.7534					
		DB-3	298	42.8456					
	Ssangyong cave	DC-1	341	49.0281	45.9129	44.71	428.81	150	
		DC-2	318	45.7212					
		DC-3	299	42.9894					
		Ssangyong cave	DD-1	335	48.1654	48.3092	47.11	451.79	22
			DD-2	295	42.4143				
			DD-3	378	54.3478				
Ordinary house	HA-1	65	9.3455	7.4764	6.28	60.21	-		
	HA-2	45	6.4700						
	HA-3	46	6.6138						
	Ordinary house	HB-1	67	9.6331	8.6266	7.43	71.24	-	
		HB-2	44	6.3262					
		HB-3	69	9.9206					
	Ordinary house	HC-1	74	10.6395	7.9078	6.71	64.35	-	
		HC-2	48	6.9013					
		HC-3	43	6.1824					

Calibration Factor :  $9.59(\text{Bq/m}^3) / (\#/d \cdot \text{cm}^2)$

Area/measurement :  $0.9936\text{mm}^2$

Days : 70 days.

"mean" : average  $\#/d \cdot \text{cm}^2$  of 3 detectors seated at one position.

"net" :  $\#/d \cdot \text{cm}^2$ , exclusive of background from mean  $\#/d \cdot \text{cm}^2$

"distance" : distance from cave' entrance to detector setting point



협재굴과 쌍용굴은 만장굴보다 낮은 라돈농도를 나타내며 서로 비슷한 경향을 보인다. 만장굴이 비교적 높은 수치를 나타내는 것은 동굴 내로 방출된 라돈이 길이 7 km가 넘는 큰 규모로 라돈이 외기로 빠져나가는데 상대적으로 많은 시간이 걸리기 때문이다. 반대로 협재굴과 쌍용굴 총 500m의 비교적 짧은 길이로 확산에 의한 외기로의 방출이 상대적으로 용이할 것이다.

일반 가옥의 경우 평균 65.3Bq/m<sup>3</sup>로 미국과학위원회 (UN SCEAR)에서 보고하는 전세계 주거공간 농도의 평균 40Bq/m<sup>3</sup>보다 다소 높은 수치를 나타낸다[UNSEAR (1988)]. 그러나 생애초과폐암 위험도를 계산 할 때 이 값을 사용하면 위험도 값을 더 크게 잡을 수 있어서 일종의 여유도를 갖게 한다.

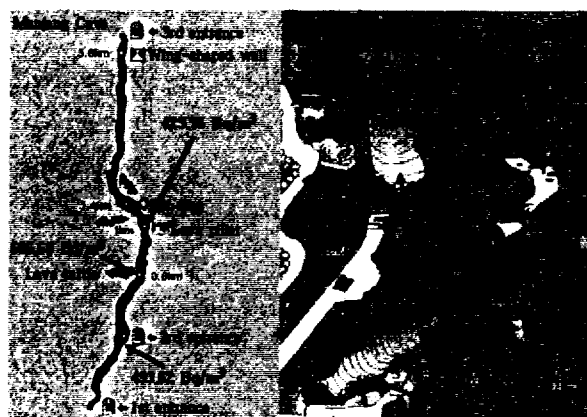


Fig 11. Radon concentration according to positions.

### 3-4. 라돈에 기인한 생애 초과폐암 위험도

실내에 일정농도 이상으로 존재하는 천연방사성 핵종인 라돈과 라돈자손을 호흡을 통해 체내로 흡입할 경우 일반인의 초과폐암위험(Excess lung cancer risk)은 높은 라돈준위에 피폭한 몇몇 지하 광부집단의 역학조사를 통해 얻어진 라돈의 총피폭량과 폐암위험의 자료를 저준위의 낮은 피폭량까지 선형적으로 외삽함으로써 이루어진다[BEIR IV (1988) ; UNSEAR (1988) ; ICRP (1987)]. 예를 들어 피폭량이 반으로 줄어들 경우 폐암발생의 위험도 반으로 줄어들어 피폭량과 폐암발생 위험은 선형비례의 관계에 있다고 평가하는 것이다. 이러한 역학조사를 통해 ICRP에서는 전 세계인의 라돈피폭에 의한 폐암사망 확률(P)을  $3 \times 10^{-4}$ /WLM로 권고하고 있다[ICRP (1993)].

한편 실내로 침투한 라돈의 붕괴로 생성되는 라돈자손

은 정전기적 성질에 의하여 벽, 바닥 또는 다른 물질에 흡착하고 환기에 의해 실외로 방출되므로 실제 실내에서 라돈과 라돈자손은 이론적인 영속평형을 이루지 못한다. 다만 주택 및 건물의 특성에 따라 라돈자손의 생성율과 제거율이 균형을 이루게 되고 결국 라돈과 라돈자손은 동적 평형상태에 도달하게 된다. ICRP는 실내의 라돈과 라돈자손의 동적 평형상태를 나타내는 척도로써 식 (1)과 같이 정의되는 평형인자(F)의 값으로 0.45를 적용할 것을 권고한다[ICRP (1987)].

$$C_{Rn} = \frac{C_{eq}}{F} \quad (1)$$

여기서,  $C_{eq}$ 은 평형등가농도(Bq/m<sup>3</sup>)이고  $C_{Rn}$ 은 라돈농도(Bq/m<sup>3</sup>).

따라서 ICRP에서 권고하는 폐암사망 확률과 평형인자를 도입하고 라돈농도와 주요 생활공간에서의 연간 점용시간과 잔여수명을 가정하면 식 (2)를 이용하여 일반인의 라돈피폭으로 인한 생애폐암 위험도를 산출할 수 있다.

$$R_e = (700 h/y \times C_{eq, h} + 2000 h/y \times C_{eq, c}) \times 50y \times \frac{WLM}{6.29 \times 10^5 Bq \cdot h/m^3} \times P \quad (2)$$

여기서,

$C_{eq, h}$ : 가정에서의 평형등가농도,

$$0.45 \times 65.3 = 29.4 Bq/m^3$$

$C_{eq, c}$ : 동굴에서의 평형등가농도,

$$0.45 \times 508.02 = 228.61 Bq/m^3$$

$P$ : 라돈피폭에 의한 폐암사망확률( $3 \times 10^{-4}$ /WLM),

700h/y: 가정에서 연간점용시간,

2000h/y: 동굴에서 연간점용시간,

50y: 잔여수명.

위의 식을 바탕으로 하여 만장굴 내 종사자에 대한 생애초과폐암 위험도를 계산하는데 있어 다음과 같은 인자와 가정을 사용하였다.

- 평균라돈농도: 가정(65.3Bq/m<sup>3</sup>) 만장굴(508.02Bq/m<sup>3</sup>)
- 평형인자(F): 0.45
- 폐암사망확률(P):  $3 \times 10^{-4}$ /WLM
- 연간점용시간: 가정(7000 시간) 동굴(2000 시간: 하루 8 시간 근무)

- 지금으로부터 50 년간 가정과 동굴에서의 평균라돈 농도에 지속적으로 노출된다.

생애 초과폐암 위험도 계산에 있어서 쌍용굴, 협재굴 내는 관광 가이드가 없고 동굴 관람시간도 길어야 30분 내외로 이에 따른 동굴 관람자의 폐암위험도는 무시할 정도로 작다. 따라서 여기서는 만장굴 550m 지점과 1km 지점에서 가이드를 하는 안내자들에 대한 위험도만을 고려한다. 그리하여 위의 수치를 가지고 만장굴 종사자의 생애초과폐암 위험도( $R_e$ )를 계산한 결과 0.016으로 산출되었다. 즉 가정과 동굴에서 위의 평균라돈농도에 50년간 지속적으로 노출될 경우 1000명에 16명이 폐암으로 사망할 위험이 있다. 그러나 동굴 가이드의 교대근무를 생각할 때 하루 4시간 근무를 가정하여 생애 초과폐암 위험도를 계산하면, 0.011로 처음의 가정에 비해 30%가 줄어든다. 그러나 실제, 만장굴 내 여성가이드의 직업수명은 길어야 4년이고 실제 근무시간도 1시간씩 하루 4시간을 감안 할 때, 실제 생애초과폐암 위험도는 0.0015의 수치로 처음의 90% 정도로 현저히 줄어든다.

#### 4. 결 론

관광지로 사람의 왕래가 잦은 만장굴, 협재굴, 쌍용굴 등을 대상으로 하여 제주 동굴에 대한 라돈농도를 측정하였다. 검출기는 고체비적검출기(CR-39)를 사용하였고 측정결과를 서울 지하철 역사나 영국 Creswell Crags 석회암 동굴계와 비교·분석하였다.

제주 동굴에 대한 측정 결과 403.08~606.7Bq/m<sup>3</sup>이 측정되었는데 이는 제주의 일반가옥에서 측정된 65.3Bq/m<sup>3</sup>보다 6배정도 높은 수치였다.

측정 결과를 서울시 지하철 역사에서의 측정치와 비교한 결과 지하철 역사의 평균라돈농도 50.4Bq/m<sup>3</sup>보다 높게 나타나는데 이는 환기의 영향으로 판단된다.

한편 동 측정결과를 영국 Creswell Crags 석회암 동굴과 비교한 결과, 입구 부근의 경우 제주 동굴이 높게 나타났고 동굴 내부의 경우 로빈 훗 동굴이 높게 나타났다. 제주 동굴의 측정결과가 입구 부근에서 로빈 훗 동굴보다 높게 나타난 것은 로빈 훗 동굴의 경우 입구가 지상에 위치하는데 반해 제주 동굴의 경우 입구가 지하에 위치하기 때문에 환기가 취약한 것으로 결론지었다. 한편, 동굴 내부의 경우 동굴을 구성하고 있는 기반암의 영향으로 석회

암 동굴인 로빈 훗 동굴이 높은 것으로 나타났다.

협재굴과 쌍용굴은 같은 지역에 위치하여 단일 동굴계를 형성하므로, 토양이나 지각 구성측면, 그리고 동굴 생성원리나 생성시대도 같으므로 라돈수치는 비슷한 양상을 나타낸다. 그리고 만장굴의 라돈농도와 비교하여 볼 때 낮은 수치를 보이는데 이는 동굴의 규모나 동굴의 깊이 그리고 동굴 기저지반의 토양함량이 다소 다른데서 기인한다.

만장굴 중간 지점에서는 가장 높은 라돈농도를 나타내는데 이 지점에는 기공과 갈라진 틈을 매운 공사의 흔적이 있었으며 이러한 틈새를 따라 라돈방출이 상대적으로 원활히 일어났다는 것을 짐작케 한다. 이러한 연유로 침투치를 나타내는 이 지점은 ICRP의 직장에서의 조치준위를 초과하지만 짧은 관광시간을 고려하면 이로 인한 피폭은 무시된다.

생애초과폐암 위험도 평가에 있어서는 만장굴 종사자에 대해 몇몇 인자를 가정하여 산출하였는데 실제 만장굴 종사자의 근무 연한이나 근무시간을 고려 할 때 0.0015%로 대단히 우려할 만한 수치를 나타내지는 않는다.

#### 감사의 글

라돈농도 측정기법에 대해 기술적인 도움을 주신 한양대학교 이재기 교수님과 김현기, 고희영님께 감사드립니다. 본 연구는 과학기술부 원자력연구개발사업 인력양성사업의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- NCRP, Ionizing radiation exposure of the population of the united states, National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP Report 93(1987)
- Khalid Jamil, K. K. Al-Ahmady, "Relative performance of different types of passive dosimeters employing solid state nuclear tracks detectors," Health Phys., Vol. 73, No. 4, 629-632(1997)
- USEPA, Reducing radon in structures, U.S. Environmental Protection Agency(1992).
- Turk, B., et al., Radon and remedial action in spokane

- river valley homes, LBL-24638(1987)
- BEIR IV, Health risks of radon and other internally deposited alpha-emitters, NAS/NRC, National Academy Press, Washington DC(1988)
- UNSEAR, Genetic and somatic effects of ionizing radiation," United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1986 Report on the General Assembly, with annexes, United Nations, New York(1988)
- UNSEAR, Source, Effects and risks of ionizing radiation."United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation," 1988 Report on the General Assembly, with annexes, United Nations, New York(1988)
- IARC, "Evaluation of carcinogenic risks to humans: Man-made fibres and radon," International Agency for research on Cancer, IARC monograph Vol. 43, Lyon(1988).
- ICRP, 1990 recommendations of the international Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60(1991)
- ICRP, Lung cancer risk from indoor exposure to radon daughters, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 50(1987)
- 이철민, 서울시 지하철에서의 라돈농도와 인체영향에 관한 연구(1999)
- Gessel T. F. and Prichard H. M. "the concentration of radon in tap water to indoor radon concentration" in: Natural Radiation Environmental III, Edited by Gesell T.F. and Lowder, W.M. U.S. Department of Energy CONF-780422, 1347, 1980
- Gillmore, G. K. Phillips P.S., Denman A.R. , Radon in the Creswell Crags Permian limestone caves, 2001
- Alloway, B. J., Heavy Metals in Soils, 2nd ed, 1995
- Brownlow A. H., Geochemistry 2nd ed., 58(1996)
- Waltham, A. C. Geological Influences on Radon in Houses in Nottinghamshire. Mercin Geologist, 12, 79-86(1991)
- 김현기, 이계석, 이재기, CR-39를 이용한 실내 라돈측정 시스템 구축, 대한 방사선 방어학회 2000추계학술 발표회, 77(2000)
- Urban M. and Piesch E."Low level environmental radon dosimetry with a passive track etch detector device," Radiat. Protect. Dosim., Vol. 1, No. 2, 97-109(1981)
- Domanski T., Chrusciewski W. and Worawski A."Method of radon and decay products equilibrium factor measurement with the use of passive track detectors," Radiat. Protect. Dosim., Vol. 8, No. 4, 231-238(1984)
- Frank, A. L. and Benton, E. V. "A diffusion chamber radon dosimeter for use in mine environment," Nucl. Instrum. Methods, 109, 537-539(1973)
- Khan H. A., Qureshi E., and Tufail M."Passive dosimetry of radon and its daughters using solid state nuclear track detectors," Radiat. Protect. Dosim. Vol. 46, No. 3, 149-170(1993)
- Espinosa G., Castano V. M. and Golzarri J. I. "Permeability of some materials to radon," Nucl. Tracks Radiat. Meas., Vol. 19, Nos. 1-4, 307-308 (1991)
- Hyland, R. Spatial and temporal variations of radon daughter concentrations within limestone caves. Unpublished doctoral dissertation, University of Huddersfield, UK. (1995)
- ICRP, Protection against radon-222 at home and at work, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 65(1993)