

# 지하공간에서의 라돈오염

김 동 술 · 김 병 화

경 회 대 학 교

환경학과 / 대기오염연구실

## 1. 머리말

최근 우리 국민의 환경보전에 대한 인식은 매우 높지만, 이러한 관심은 소음, 수질, 폐기물 오염에 치중된 느낌이며, 대기오염 특히 실내 공기오염에 대한 무관심과 무지는 70년대와 비교하여 커다란 차이가 없다. 이는 청각, 시각, 미각 등의 감각적 환경피해가 발생할 때만 비로소 관심을 보이는 소극적 환경오염 대처의식 때문이다. 그러나 현대도시인의 생활 및 생산활동은 주로 실내공간에서 이루어지고 있으며, 이들 실내공간은 에너지 절약의 일환 및 열악한 실외공기의 차단 등으로 밀폐되고 있어, 실내공기오염의 심각성이 재거론되고 있는 실정이다. 이미 오래 전부터 구미 각국에서는 실내공기에 관심을 가지고 연구를 실행하고 있으며, 실내공기오염물질 중 하나인 라돈 (Radon; Rn-222)에 대하여 건강에 미치는 영향 및 라돈의 규제에 대한 논의가 활발히 진행되고 있다. 최근, 우리나라에서도 라돈오염에 대한 경각심이 높아가고 있으며, 라돈에 관한 기준치의 설정과 규제 및 저감대책의 마련이 시급한 실정이다. 우리나라에서 라돈에 관한

연구는 지하철 역과 일부 제한된 지역을 대상으로 농도의 분포연구가 한정적으로 수행된 적이 있다.<sup>1) 2) 3) 4)</sup>

## 2. 라돈의 일반적 개요

### 2.1 라돈의 물리화학적 특성

인간은 태어나면서부터 방사선에 노출되고 있는데, 과거 원자탄이나 핵발전소에서 누출된 사고성 방사선과 같이 예외적인 경우를 제외하고도, 수없이 많은 천연 및 인위적 방사선에 노출되고 있다. 라돈은 지구상에서 발견된 약 70여 가지의 자연 방사능 물질 중의 하나이고 인체에 흡입되기 가장 쉬운 가스상 물질이다.<sup>5)</sup> 이중 자연계에 널리 존재하는 자연방사성 물질인 라돈은 평생 인체에 노출되는 자연방사능의 56%를 차지하고 있다. 참고로 X-선 등 의료행위는 11%, 우주광선의 영향은 약 8%를 차지한다고 보고된 바 있다.

‘라돈 (Radon)’은 1900년 Friedrich Ernst Dorn에 의해서 발견되어 한때 니톤 (Niton)으로 불리운 적도 있으나, 1923년에 라돈으로 명명되었다. 라돈은 직경 0.37 nm의 단원자

로 구성되어 있으며, 비점 208 K, 빙점 160 ~ 202 K이다. Henry의 법칙에 따라 액체 중 라돈의 농도는 가스상 라돈의 농도에 비례한다. 라돈은 물에는 약간 용해되지만, 톨루엔 등에는 매우 잘 녹는다. 또한 활성탄 등에 흡착이 잘 되기 때문에 이들을 흡수액 또는 흡착제로 측정과 처리과정에 이용하고 있다. 또한, 라돈은 공기보다 9배 정도 밀도가 큰 무거운 가스로서, 무색, 무취, 무미의 비활성 물질이다. 라돈 원자는 우라늄에서 시작하여 붕괴과정을 수 차례 거친 후, 라듐을 거쳐 납까지 도달하는 과정에서 생성된다. 즉, 우라늄은 대략 45억년이 경과한 후 붕괴되어 라듐이라는 자손을 보게 되며, 라듐은 대략 1,600년만에 라돈이라는 딸을 얻는다. 라돈 역시 폴로늄과 납 등과 같은 자손을 둔다. 따라서 우라늄과 라듐이 농축된 지역에서는 당연히 라돈의 농도가 높게 된다.

인체에 많은 영향을 주는 라돈의 동위체에는 Rn-220과 Rn-222가 있는데, 일반적으로 라돈이라고 일컫는 Rn-222는 여러 동위체 중 가장 유해한 가스이다. 일단, 생성된 라돈 그 자체는 화학적으로는 안정하여 반응성이 없는 가스상태이지만, 이와 같은 라돈은 50%가 불과 나흘만에 최종 납까지 붕괴하며, 이때 4회의 알파선을 방출하고 90%가 13일 안에 붕괴된다. 알파선은 투과력이 약해서 인간의 피부를 투과하지는 못하지만, 우리의 폐세포와 같은 얇은 층은 투과하며 이때 방출된 알파선은 폐세포 내의 DNA를 직간접적으로 손상시켜 폐암을 야기시킨다. 따라서, 호흡을 통해 인체에 유입된 라돈만이 절대적으로 유해하며 폐암의 발생율을 높인다.<sup>6)</sup>

베크렐 (Becquerel)은 1896년 우라늄에서

감마선을 발견한 과학자이며 큐리 (Curri)는 라듐원자를 발견한 공로로 노벨상을 수상하였다. 방사능의 단위인 '베크렐 (Bq)'과 '큐리 (Ci)'는 이들의 이름에서 연유한다. 1 Bq은 1초에 방사선 하나가 1회 방출되는 것을 의미하며, 1 Ci는 라듐 1 g이 1초간 방사선을 방출하는 능력을 의미한다. 라듐 1 g은 1초 동안 370억 번 붕괴하므로 1 Ci는 370억 Bq가 된다. 자연과학에서는 숫자가 너무 크거나 작을 경우 접두사를 사용하여 간단히 표시하는데, 1 pCi (피코큐리)는 1조분의 1 Ci를 의미하므로 1 pCi는 0.037 Bq가 된다. 따라서 공기 1리터 또는 1입방미터에 존재하는 방사능으로 표시하면, 1 pCi/L = 37 Bq/m<sup>3</sup>라는 등식이 성립한다.

## 2.2 라돈의 오염원

과거에는 라돈이나 라돈 낭핵종에 관한 오염은 단지 우라늄 광산과 관련된 문제라고 믿었다. 그러나 최근 조사에서 우라늄이나 인산 광산 혹은 이를 처리하는 공장과 멀리 떨어져 있는 가정이나 빌딩에서도 고농도의 라돈이 측정되었으며, 가정의 지하실이나 빌딩 실내를 대상으로 광범위한 연구가 진행되고 있다.<sup>7) 8) 9) 10) 11)</sup> 특히, 미국 환경보호청 (EPA, Environmental Protection Agency)에서는 3층 이하 건물에 주거하는 거주자에게 라돈농도 측정을 권장하고 있으며, 일정 농도를 초과하는 경우 행동지침 (Action Guideline)에 따라 저감하도록 홍보하고 있다.<sup>12)</sup>

우라늄은 지구상의 모든 토양 중에 미량으로 존재하므로 모든 토양은 미량의 라돈을 방출하며, 우라늄과 라듐을 함유한 건축자재, 지하수, 음용수, 석탄 및 천연가스 등에서도

라돈이 방출된다.<sup>13) 14) 15)</sup> 실내라돈은 건축자재, 음용수, 가스 및 석탄과 같은 에너지원에서 실내에 유입되며, 기후 및 기상, 거주자의 생활습관, 건물의 환기여부 등과 같은 인자에 영향을 받는다.<sup>16) 17) 18)</sup> Quindos 등은 건축자재 중 각국 콘크리트 속의 라듐 농도 자료를 이용하여 라돈의 농도를 추정하였는데, 스웨덴을 비롯한 일부 나라의 시멘트에서 고농도의 라돈이 측정되었으며, 콘크리트, 시멘트 블럭, 석고 보드, 대리석 등의 실내 건축자재에서도 경우에 따라 고농도의 라듐 또는 우라늄이 측정되었다.<sup>19)</sup> 특히, 실내 구조물로서 같은 수준의 라듐을 함유하는 시멘트를 이용할 때, 시멘트 블럭 벽은 거푸집 속에 시멘트를 부어 만든 콘크리트 벽보다 많은 라돈을 발생시킨다. 이는 시멘트 블럭이 보다 많은 기공을 가지고 있을 뿐만 아니라, 일반적으로 건축 후 거푸집 벽보다 갈라진 틈이 많기 때문이다. 한편, 연방방사능보호위원회(NCRP, National Council of Radiation Protection)는 여러 가지 광석과 토양을 대상으로 주방사성 농도를 측정한 바 있는데, 화강암은 일반적으로 석회암이나 사암 같은 퇴적암보다 U-238, Th-232의 함유량이 2배에서 3배 가량 더 높게 측정되었으며, 혈암이나 인산광석 중의 일부는 U-238의 함유량이 매우 높게 나타났다.<sup>20)</sup>

Nazaroff 및 Hess 등에 의하면, 지표수의 경우 실내의 라돈 농도에 대한 기여도는 매우 낮으나, 지하수의 경우 기여도가 높았다.<sup>21) 22)</sup> 라돈은 온도가 낮을 수록 물 속에 용해도가 높으므로 라돈가스를 함유한 토양이나 바위에 차가운 지하수가 흐를 때 상당량의 라돈을 흡수한다. 실내에서는 샤워, 화장실에서

물을 뿜을 때, 접시 닦을 때, 세탁 할 때, 물 사용 때, 공기 중으로 라돈이 방출된다. 음용수에서의 라돈은 실내 공기 중 라돈농도의 약 1~7 % 정도만 기여한다.

### 2.3 라돈의 위해성과 기준치

유해물질이 인체에 노출되는 경로는 피부, 섭취 및 호흡 등 3가지로 나눌 수 있다. 구미지역의 경우 라돈은 아직도 류마티스, 스트레스 및 관절염 등에 제한적으로 사용되고 있다. 한때 우리나라에도 있었던 라돈탕 목욕은 의사의 엄중한 처방 하에 이루어지고 있다. 라돈에서 방출된 알파선은 인간의 두꺼운 피부를 투과할 수는 없으나, 얇은 폐세포에는 영향을 주기 때문에, 호흡을 통해 인체에 유입된 라돈만이 절대적으로 유해하며 폐암과 관련이 있다. 미국에서는 공익 TV광고 등을 통해, 지하수를 이용하는 주택의 목욕탕은 반드시 샤워기 꼭지쪽에 후드를 설치하도록 홍보하기도 하였다. 이는 지하수 속에 함유된 라돈가스가 샤워 중 호흡기로 흡입되지 않도록 한 조치이다.

미국 환경보호청에서는 환경의 위해성을 비교평가하기 위해 다음과 같은 자료를 한 예로 제시한 적이 있다. 즉, 각종 환경오염에 의해 연간 암으로 사망하는 숫자는 농약에 의해 100명, 유해폐기물 지역에서 1,100명, 독성 대기오염물질에 의해 2,000명, 음식의 잔류농약에 의해 6,000명, 라돈에 의해 14,000명 정도라고 한다. 미 환경보호청이 제시한 자료는 단지 추정치로서 실제 농약에 의해, 또는 라돈의 의해 죽은 사람의 수를 계산한 것은 아니다.

오염물질의 위해성 평가는 최근 수십 년간

수행되어 왔던 환경연구분야 중 가장 어려운 분야로 이는 도처에 산재하는 과학의 불확실성 때문이다. 그럼에도 불구하고, 위해성 평가자료가 수시로 인용되고 있는 것은 일반 대중을 쉽게 설득할 수 있고, 환경오염의 심각성을 쉽게 부각시킬 수 있기 때문이다. 하지만 기초연구가 활성화되어 기초자료가 충분히 확보될 때, 이러한 불확실성은 감소하며 신뢰도도 회복될 수 있다. 라돈의 위해성 연구는 통계자료를 근간으로 한 것으로 비판적 및 낙관적 평가사이에 커다란 차이가 있다. 라돈의 경우 이미 전세계에서 수백만 건의 측정과 풍부한 자료를 바탕으로 합리적 기초연구가 수행된 바 있다. 또한 많은 학술토론을 거친 바 있어 평가의 신뢰성은 크게 개선되었다고 할 수 있다. 다음은 라돈의 위해성에 대해 여러 연구기관이 발표한 내용이다.

미국 환경보호청에 의하면, 미국 및 1997년 말까지 우리나라의 권고치이기도 한 4 pCi/L(피코큐리/리터)는 1년에 백만 명당 28명 정도가 사망하는 수준이라고 하며, 미연방암연구소(NCI, National Cancer Institute)는 4 pCi/L의 농도를 보이는 주택에서 30년간 거주했을 때, 폐암으로 진행될 위험도가 14% 증가한다고 보고한 바 있다.<sup>23)</sup> 한편, 1998년 2월 미과학원(NAS, National Academy of Sciences)은 미국에서의 연간 폐암 사망자는 158,000명 정도이며, 폐암의 주원인은 흡연이지만, 이 중 15,000~22,000명 정도가 라돈만에 의해 사망한다고 발표한 바 있다.<sup>24)</sup> 또한, 미국 환경보호청은 라돈 농도가 20 pCi/L인 곳에서 평생동안 노출될 경우, 흡연자 1,000명 중 135명이 폐암에 걸릴 수 있으

며, 비흡연자 1,000명 중 8명이 폐암에 걸릴 수 있다고 발표하였다.<sup>25)</sup> 이는 라돈이 주로 미세분진에 흡착되어 체내에 유입되기 때문에 미세먼지오염이 극심한 지하철 같은 곳에서는 라돈피해가 가중됨을 의미한다.

미국환경보호청은 실내공기에서의 라돈 기준을 4 pCi/L로 규정하고, 이 기준치를 초과하면 개선조치를 취하도록 권고하고 있다. 이 농도는 사람이 70년 동안 라돈에 피폭되었을 때 폐암에 걸릴 확률이 1~5% 정도인 것을 나타내는 수치이다.<sup>6)</sup> 이 수준은 이 농도보다 낮으면 무해하다는 의미는 결코 아니고, 현재의 기술성과 경제성을 검토할 때 저감이 가능한 수준이란 의미이다.<sup>26)</sup> 예를 들어, 미국에서 이 수치를 2 pCi/L로 낮출 경우, 1,000억 달러 이상의 비용이 추가로 소요될 것으로 추정하고 있으며, 신규 건물의 경우 2 pCi/L를 초과하지 않도록 조치를 취하고 있다. 참고로 1990년 미국환경보호청의 조사 결과 미국 내 가정의 평균농도는 1.4 pCi/L였으며, 이 중 10% 가량이 실내 대기 권고치인 4 pCi/L를 초과하고 있었고, 1.9% 가량이 10 pCi/L를 초과하는 것으로 조사되었다.<sup>27)</sup>

라돈의 장기간 저농도 노출에 관한 국가차원의 기준이 설정된 나라는 스웨덴과 미국으로, 스웨덴의 경우 1979년 라돈위원회가 구성되어, 1983년 신축주택에서는 1.9 pCi/L, 개축주택에서는 5.4 pCi/L, 기존 주택에서는 10.8 pCi/L 이하로 라돈의 기준농도를 규정한 바 있다.<sup>1)</sup>

우리나라에서는 1989년 9월 '지하공간공기질 환경기준'에 라돈의 권고기준치가 4 pCi/L로 설정되어 최근까지 운영되어 왔으나,

1997년 12월 31일 '지하생활공간 공기질관리법' 제정시 라돈의 권고치가 누락되어 현재는 기준이 없는 상태이다. 비록 지하철 내의 이용시간이 짧아 주거환경과는 차이가 있지만, 지하철 공간을 작업장 또는 사업장으로 간주하고 기준치를 채택한다면 커다란 논란이 예상된다. 중요한 점은 수백만 시민이 이용하는 지하철은 시민이 확보하고 이용하는 생활공간이라는 것이다.

#### 2.4 라돈의 측정 및 저감방법

라돈 및 라돈 붕괴산물(Radon Decay Product)의 농도를 측정하는 방법에는 여러 가지가 있다.

시료포집 기간에 따라 장·단기 방법으로 나눌 수 있는데, 주로 장기법은 수동적 확산효과를 이용한 적산식이며, 단기법은 능동적으로 펌프를 이용한 순간채취식이다. 이중 적산식은 대부분 비용이 적게 드는 수동 시료채취 방법이지만, 시료 적산을 위해 수개월 이상의 시료 채취 기간이 필요하다. Shimo 등은 여러 가지 측정 방법을 이용하여 실외 및 실내 대기에서 라돈의 농도를 측정하여 상호 비교한 바 있다.<sup>28)</sup> 라돈의 측정과 분석은 주어진 지하공간의 구조 및 실내환경에 의해 결정되며 분석비용도 커다란 차이를 보인다. 표 1은 라돈의 붕괴산물은 제외하고 라돈가스의 농도를 결정하는 방법을 정리한 것이다.<sup>29)</sup>

실내에서의 라돈 저감방안은 크게 오염원의 제거방안, 오염원의 관리방안 및 적극적

인 공기정화방안 등 3가지로 나눌 수 있다. 이들 방안은 건축구조물을 신설하거나 개축할 때 적용할 수 있으며 기존 구조물에도 적용된다. 표 2는 이러한 저감방안을 개괄적으로 제시한 것이다.<sup>30)</sup>

건축물에서의 라돈농도는 주로 건물의 구조물 공사와 기초공사에 사용한 토양, 그리고 토양의 투과성에 의존하므로, 건축물을 공사하기 전에 라돈의 존재여부나 농도 수준에 의심이 갈 경우 토양조사가 선행되어야 한다. 미국의 경우 1992년 에너지국(DOE, Department of Energy)의 연방 우라늄 조사 프로그램(National Uranium Resource Evaluation Program)에 의해 미국 전역에 대한 토양에서의 라돈의 지리적 농도분포를 조사한 바 있으며, 이밖에도 미국 지리조사국(USGS, Geological Survey)과 미국 환경보호청에서는 실내 라돈농도에 대해서 대대적인 조사를 실시한 바 있다.<sup>31)</sup>

따라서, 다른 어떠한 방안보다도 가장 경제적인 방안은 건축물을 신축할 때 라돈의 농도, 투과도 등과 같은 예비조사를 통해 저감방안을 마련하는 것이다. 일반적으로 실내 환경에서 발생된 라돈농도를 감소시키고 라돈에 의한 피해를 최소화하려면 건축시 방사능 오염물질이 적게 섞인 모래와 시멘트를 이용하여야 하고, 지하실은 바닥이 갈라진 틈이 없도록 처리하며 환기장치를 설치하여 적당한 환기를 통하여 실내에 방사능 가스가 축적되는 것을 방지하여야 한다.<sup>32)</sup>

표 1. 라돈가스 측정법의 개요

측정방법	원 리 및 장 단 점
1. 활성탄 흡착법	라돈이 활성탄 입자에 흡착되는 원리를 이용하여, 밀폐용기에 활성탄을 채우고 흡착된 라돈에서 방출되는 감마선을 계수하여 농도로 환산한다. 주로 2~7 일 간 포집하여 측정하며, 활성탄이 지속적으로 라돈을 흡착 및 탈착하므로 측정 오차가 발생할 수 있다.
2. 알파선 검출법 (Filtered)	작은 용기내에 작은 특수플라스틱 조각이나 필름을 넣은 검출기를 이용한다. 시료공기는 용기내 필터를 통하여 유입된다. 라돈과 라돈붕괴자손에 의해 방출되는 알파입자가 검출기 표면에 흡집을 만들게 되고, 이 단위면적당 생성된 흡집을 현미경이나 광학 관독기로 계수하여 라돈 농도를 계산한다. 보통 3~12 개월간 방치하여 측정하지만 적산식이기 때문에 고농도인 경우 단기 측정도 가능하다.
3. 무필터 알파선 검출법	원리는 상기 알파선 검출법과 동일하나, 라돈붕괴산물 및 기타 알파입자 방출 물질을 제거시키는 필터가 부착되어 있지 않다. 무필터이기 때문에 이 방법으로 계산된 농도는 순수한 라돈 농도는 아니다. 라돈 붕괴산물의 농도는 평형비에 의존한다. 현재 EPA에서는 평형분율이 0.35 이하이거나 0.60 이상일 때, 이 방법을 이용하지 말 것을 권고하고 있으며, 이 방법에 대한 표준화 논의가 계속되고 있다.
4. 활성탄을 이용한 액체 섬광 계측법	라돈 포집을 위해 활성탄을 채운 극소형 용기를 사용한다. 포집 원리는 활성탄 흡착법과 동일하지만, 활성탄을 섬광 용액으로 처리하고 이 용액을 섬광계측기 (Scintillation Counter)로 분석하는 점이 다르다. 시료의 포집기간은 2~7일 정도이다.
5. 연속식 라돈 측정법	실시간 연속식으로 측정하는 방법으로 시료공기는 기계적으로 또는 확산에 의해 계수실(Counting Chamber)에 유입된다. 계수실은 때로는 섬광 Cell 또는 이온화실(Ionization Chamber)로 불리우며, 섬광계수는 전기적으로 처리되어 라돈 농도가 환산되고 이 정보는 메모리에 저장된다.
6. 일렉트렛을 이용한 이온챔버법 (단장기 측정시)	정전기적으로 하전된 원판형 검출기(Electret)가 작은 용기(Ion Chamber)에 장착되어 있다. 라돈은 필터를 통해 확산되어 유입되며, 라돈과 라돈 붕괴자손의 붕괴에 의해 야기되는 이온화 현상으로 일렉트렛의 전압은 떨어지게 된다. 이 현상을 이용하여 라돈 농도를 계산한다. 검출기에 따라 장기 측정기기는 1~12 개월, 단기 측정기기는 2~7 일간 방치하여 측정하는 적산식 측정법이다.

7. 활성탄을 이용한 순간 채취법	시료공기를 활성탄이 채워진 카트리지에 펌프 또는 송풍기로 유입시켜 측정하는 방법으로 숙련된 포집기술이 필요하다. 보통 15분~1시간 가량 포집하여 측정하며, 시료 포집 후의 분석방법은 1 또는 4와 유사하다.
8. 섬광셀을 이용한 순간 채취법	우선, 필터로 라돈의 붕괴산물을 제거시킨다. 시료를 포집하기 전, 섬광 Cell을 진공상태로 만들고 현장에서 밸브를 열어 시료공기를 유입시킨 후 밀봉한다. 시료포집에는 숙련된 기술이 필요하다. 시료공기를 분석하기 위해 Cell의 창 끝을 광전증배관(Photomultiplier Tube)에 위치시키고 라돈에서 방출된 알파입자가 Cell 내부에 코팅되어 있는 ZnS에 충돌할 때 발생하는 섬광을 감지하여 라돈농도로 환산한다.
9. 펌프와 포집 bag을 이용한 순간 채취법	휴대용 펌프를 이용하여 라돈의 영향을 받지 않는 재질의 시료 Bag에 라돈을 포집하는 방법이다. 이 시료 Bag을 실험실로 운반하여 분석하며, 일반적인 분석방법은 Bag에 포집된 시료공기를 섬광 Cell로 옮겨서 분석하는 상기 방법 8과 동일하다.
10. 진공 섬광 셀을 이용한 3일 적 산 포집법	섬광 Cell에 압력제한밸브와 감압 측정기를 장치하고, Cell을 진공상태로 만든다. 시료포집 현장에서 포집기간이 3일이 되도록 시료공기를 서서히 유입시킨다. 이 때 숙련된 기술이 필요하다. 시료포집이 끝나는 날, 용기를 밀봉하고 실험실로 운송한 후 분석한다. 분석원리와 방법은 상기 방법 8과 유사하다.
11. 펌프와 시료 bag을 이용한 24시간 포집법	라돈에 영향을 받지 않은 재질의 Bag에 시료공기를 펌핑하여 24시간 동안 포집한다. 시료 포집 후의 분석방법은 상기 방법 9와 유사하다.

출처 : USEPA Radon Measurement Method Definitions(<http://www.epa.gov/radonpro/methods.htm>), 1998

표 2. 라돈가스의 저감방안 개요

저감방안	특 징
오염원 제거	실내 라돈의 주요 오염원은 토양이므로, 라듐의 농도가 낮은 곳에 건축하면 실내 라돈의 농도는 매우 낮게 나타난다. 따라서, 건축택지를 결정할 때 토양 중의 라듐농도, 투과성, 수분 함량 등의 지형적인 특성을 파악해야 한다. 건물을 지을 때 토양 중 고농도의 라듐이 발견된다면, 건물 기초에서 3 m 정도의 흙을 제거하고, 저농도 라듐 흙으로 교체하는 방법은 경제적이며 자주 이용되고 있다.

<p>건축물 신축시 고려할 사항</p>	<p>건축물을 신축할 때 토양과 건축물의 기초사이에 물리적 경계를 두어 흙과의 직접적인 접촉을 감소시켜 라돈 농도를 저감시킬 수 있다. 일반적으로 환기가 효율적으로 이루어져 토양가스가 배선 및 배관공간으로 빠지도록 설계하고 있다. 또한, 지하층과 토양과의 압력차를 이용하여 수동적으로 토양가스가 외기로 방출되도록 골뚝을 설치하는 방법이 자주 이용되고 있다. 이 때 토양가스의 투과도는 슬라브 하층에 골재(또는 석재)을 최소 10 cm 가량 채워 넣어 주면 향상될 수 있다. 한편, HVAC 설치를 통해 지하실로 유입되는 라돈가스를 효율적으로 저감할 수 있다.</p>						
<p>오염원 관리</p>	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="235 600 344 909"> <p>라돈유입 경로차단</p> </td> <td data-bbox="344 600 1244 909"> <p>노후 건축물에서 라돈을 저감시키기 위한 가장 일반적인 방법은 라돈의 유입경로를 차단하거나 밀폐하는 방법이다. 일단, 라돈은 건축물과 외기와의 음압차에 의한 실내 대류현상으로 건축물 내부로 유입되므로, 유입구를 확인하는 것이 중요하다. 라돈의 주요 유입구는 배수관 주변, 가스관 및 상수도관 주변, 틈이 많은 콘크리트 블록 벽, 열팽창 또는 수축으로 인해 갈라진 틈 등이다. 틈이나 연결부위를 통해 라돈 가스가 유입되는 것을 밀봉하기 위해 각종 밀폐제가 개발되어 사용되고 있다.</p> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="235 909 344 1174"> <p>Subslab 환기</p> </td> <td data-bbox="344 909 1244 1174"> <p>Subslab의 환기설비는 건물구조 및 기초의 구조에 따라 설계가 달라진다. 만약, 건축물의 기초 밑이 골재로 채워있다면 토양가스의 배기관은 지하층을 통해 골재 내부로 삽입시켜야 한다. 보통 50~100 Pa의 압력차를 갖도록 송풍기를 설치한다. 이 방법은 노후 건물에 효과적이지만, 지하층에 갈라진 틈이 많을 경우 효과가 반감될 수 있다. Canada와 Sweden에서 가장 많이 사용되는 기법이다.</p> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="235 1174 344 1348"> <p>지하실의 가압</p> </td> <td data-bbox="344 1174 1244 1348"> <p>지하실에 가압을 하게 되면 건축물 내부로 라돈이 유입되는 것을 확실히 방지할 수 있지만, 이 방법 역시 지하층이 완벽하게 밀폐되어 있을 때에만 효과적이다. 보통 3~4 Pa의 가압으로 라돈농도를 저감시킬 수 있으나, 지속적 환기로 인한 에너지 비용 및 소음 등이 문제가 될 수 있다.</p> </td> </tr> </table>	<p>라돈유입 경로차단</p>	<p>노후 건축물에서 라돈을 저감시키기 위한 가장 일반적인 방법은 라돈의 유입경로를 차단하거나 밀폐하는 방법이다. 일단, 라돈은 건축물과 외기와의 음압차에 의한 실내 대류현상으로 건축물 내부로 유입되므로, 유입구를 확인하는 것이 중요하다. 라돈의 주요 유입구는 배수관 주변, 가스관 및 상수도관 주변, 틈이 많은 콘크리트 블록 벽, 열팽창 또는 수축으로 인해 갈라진 틈 등이다. 틈이나 연결부위를 통해 라돈 가스가 유입되는 것을 밀봉하기 위해 각종 밀폐제가 개발되어 사용되고 있다.</p>	<p>Subslab 환기</p>	<p>Subslab의 환기설비는 건물구조 및 기초의 구조에 따라 설계가 달라진다. 만약, 건축물의 기초 밑이 골재로 채워있다면 토양가스의 배기관은 지하층을 통해 골재 내부로 삽입시켜야 한다. 보통 50~100 Pa의 압력차를 갖도록 송풍기를 설치한다. 이 방법은 노후 건물에 효과적이지만, 지하층에 갈라진 틈이 많을 경우 효과가 반감될 수 있다. Canada와 Sweden에서 가장 많이 사용되는 기법이다.</p>	<p>지하실의 가압</p>	<p>지하실에 가압을 하게 되면 건축물 내부로 라돈이 유입되는 것을 확실히 방지할 수 있지만, 이 방법 역시 지하층이 완벽하게 밀폐되어 있을 때에만 효과적이다. 보통 3~4 Pa의 가압으로 라돈농도를 저감시킬 수 있으나, 지속적 환기로 인한 에너지 비용 및 소음 등이 문제가 될 수 있다.</p>
<p>라돈유입 경로차단</p>	<p>노후 건축물에서 라돈을 저감시키기 위한 가장 일반적인 방법은 라돈의 유입경로를 차단하거나 밀폐하는 방법이다. 일단, 라돈은 건축물과 외기와의 음압차에 의한 실내 대류현상으로 건축물 내부로 유입되므로, 유입구를 확인하는 것이 중요하다. 라돈의 주요 유입구는 배수관 주변, 가스관 및 상수도관 주변, 틈이 많은 콘크리트 블록 벽, 열팽창 또는 수축으로 인해 갈라진 틈 등이다. 틈이나 연결부위를 통해 라돈 가스가 유입되는 것을 밀봉하기 위해 각종 밀폐제가 개발되어 사용되고 있다.</p>						
<p>Subslab 환기</p>	<p>Subslab의 환기설비는 건물구조 및 기초의 구조에 따라 설계가 달라진다. 만약, 건축물의 기초 밑이 골재로 채워있다면 토양가스의 배기관은 지하층을 통해 골재 내부로 삽입시켜야 한다. 보통 50~100 Pa의 압력차를 갖도록 송풍기를 설치한다. 이 방법은 노후 건물에 효과적이지만, 지하층에 갈라진 틈이 많을 경우 효과가 반감될 수 있다. Canada와 Sweden에서 가장 많이 사용되는 기법이다.</p>						
<p>지하실의 가압</p>	<p>지하실에 가압을 하게 되면 건축물 내부로 라돈이 유입되는 것을 확실히 방지할 수 있지만, 이 방법 역시 지하층이 완벽하게 밀폐되어 있을 때에만 효과적이다. 보통 3~4 Pa의 가압으로 라돈농도를 저감시킬 수 있으나, 지속적 환기로 인한 에너지 비용 및 소음 등이 문제가 될 수 있다.</p>						
<p>공기 정화</p>	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="235 1348 344 1528"> <p>공기 정화기의 사용</p> </td> <td data-bbox="344 1348 1244 1528"> <p>실내공기는 전기집진기, 천장형 선풍기, 필터방식 집진기, 음이온 및 양이온 발생기를 통해 정화될 수 있다. 이중 전기집진기는 실내 분진과 잠재적 알파에너지의 농도를 저감시킬 수 있으며, 이중 양이온 발생기와 천장형 선풍기를 조합한 정화기는 잠재적 알파에너지 농도를 87%까지 저감시킬 수 있다.</p> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="235 1528 344 1704"> <p>환기량의 증가</p> </td> <td data-bbox="344 1528 1244 1704"> <p>건물내에서 라돈 농도를 저감시키는 가장 간단하며 효율적인 방안은 환기율을 늘리는 것이다. 외기를 직접 유입하는 방법은 라돈 농도를 희석시키며, 가압효과도 얻게되므로 토양으로부터의 라돈 방출을 줄일 수 있다. 또한, 배관 및 배선관을 통한 기계적 환기는 건축물로 유입되는 라돈 농도를</p> </td> </tr> </table>	<p>공기 정화기의 사용</p>	<p>실내공기는 전기집진기, 천장형 선풍기, 필터방식 집진기, 음이온 및 양이온 발생기를 통해 정화될 수 있다. 이중 전기집진기는 실내 분진과 잠재적 알파에너지의 농도를 저감시킬 수 있으며, 이중 양이온 발생기와 천장형 선풍기를 조합한 정화기는 잠재적 알파에너지 농도를 87%까지 저감시킬 수 있다.</p>	<p>환기량의 증가</p>	<p>건물내에서 라돈 농도를 저감시키는 가장 간단하며 효율적인 방안은 환기율을 늘리는 것이다. 외기를 직접 유입하는 방법은 라돈 농도를 희석시키며, 가압효과도 얻게되므로 토양으로부터의 라돈 방출을 줄일 수 있다. 또한, 배관 및 배선관을 통한 기계적 환기는 건축물로 유입되는 라돈 농도를</p>		
<p>공기 정화기의 사용</p>	<p>실내공기는 전기집진기, 천장형 선풍기, 필터방식 집진기, 음이온 및 양이온 발생기를 통해 정화될 수 있다. 이중 전기집진기는 실내 분진과 잠재적 알파에너지의 농도를 저감시킬 수 있으며, 이중 양이온 발생기와 천장형 선풍기를 조합한 정화기는 잠재적 알파에너지 농도를 87%까지 저감시킬 수 있다.</p>						
<p>환기량의 증가</p>	<p>건물내에서 라돈 농도를 저감시키는 가장 간단하며 효율적인 방안은 환기율을 늘리는 것이다. 외기를 직접 유입하는 방법은 라돈 농도를 희석시키며, 가압효과도 얻게되므로 토양으로부터의 라돈 방출을 줄일 수 있다. 또한, 배관 및 배선관을 통한 기계적 환기는 건축물로 유입되는 라돈 농도를</p>						



	<p>효율적으로 감소시킬 수 있다. 또한, 송풍기 없이도 열교환설비를 통해 소량의 라돈을 저감시킬 수 있다. 라돈은 대개 분진에 흡착되어 인체에 유입되므로, 분진의 농도가 낮을 때는 공기를 순환시키는 방법도 효율적이다.</p>
<p>흡착법</p>	<p>라돈의 활성탄 흡착정도는 라돈의 농도, 처리 공기량, 상대습도에 좌우된다. 일반적으로 환기율이 낮고, 지하공간과 지면에서의 라돈농도 비율이 높을 경우 비효율적이다. 활성탄 흡착을 이용한 기술을 경제적으로 사용하기 위해서는 고효율력을 가진 활성탄을 사용해야 하며, 습도 및 VOC 등과 같은 방해 효과를 최소화시켜야 한다.</p>

출처 : Indoor Air Quality & Control, 1993, p.190-201

### 3. 서울시 지하철의 라돈오염 현황

#### 3.1 실험절차 및 방법

서울시민의 주요 교통수단인 지하철에서 이용객이 가장 많은 대합실과 승강장, 역무실 및 외부공기를 대상으로 라돈농도를 측정 조사하였다. 라돈의 측정은 1997년 12월부터 1998년 11월까지 계절별로 환승역을 포함한 서울시 전체 지하철역(1~8호선: 6호선제외) 175개역을 대상으로 대합실, 승강장 및 외기 등 3개 지점에서 라돈농도를 측정하였다. 라돈농도는 동일지역이라 할지라도 지하철역의 주변환경(환기량, 온·습도 및 건축물의 구조 등)에 따라 크게 변할 수 있으므로 많은 주의가 필요하다. 두 번째 단계는 2차 측정 과정으로 측정대상역사 중 고농도를 보이는 일부구간을 선정하여, 전일측정(14시간)조사를 수행하여 농도변화를 관찰하였다.

지하철역사의 실내공기 중 라돈 농도를 측정하기 위해, 미국 Femto-Tech 사의 연속식 라돈 모니터(Model R210F)를 사용하였다.

모니터는 측정지점으로 이동 후 최소 5분간 안정화시킨 후, 10분간 2~3회 측정하여 평균치를 계산하여 농도로 환산하였다. 한편, 2차 정밀측정 중 전일측정시에는 지하철이 운행되는 오전 7시부터 오후 10시까지 14시간 동안 10분간 측정을 최대 60회까지 연장하여 농도를 계산하였다. 본 연속식 라돈 모니터는 이동식 검출기이며, 또한 일정 시간동안 축적식으로도 이용할 수 있어, 라돈농도의 조사 및 측정에 양호한 장치이다.<sup>33)</sup> 이 모니터는 수동확산 방식으로 Rn-222 만을 측정할 수 있으며, 매 6개월마다 Femto-Tech 사에 보내 영점조정을 하였다. 연속식 라돈 모니터에 대한 구체적 설명은 여타 문헌을 참고할 수 있다.<sup>34)</sup>

#### 3.2 결과 및 고찰

##### (1) 전체 지하철역의 라돈농도

1997년 12월부터 1998년 11월까지 175개 전체역을 대상으로 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8 호선의 라돈농도를 조사하였다. 농도의 범위는 제 1

기 지하철 1호선의 경우, 승강장 0.1~4.0 pCi/L, 대합실 0.5~3.1 pCi/L, 외기 0.6~4.0 pCi/L로 조사되었으며, 2호선은 승강장 0.0~4.9 pCi/L, 대합실 0.0~5.1 pCi/L, 외기 0.0~4.4 pCi/L이었다. 3호선은 승강장 0.1~5.4 pCi/L, 대합실 0.1~5.6 pCi/L, 외기 0.0~5.1 pCi/L이었고, 4호선은 승강장 0.0~8.0 pCi/L, 대합실 0.1~6.3 pCi/L, 외기 0.2~3.3 pCi/L이었다. 반면 제 2기 지하철의 경우 5호선은 승강장 0.1~11.2 pCi/L, 대합실 0.1~14.8 pCi/L로 조사되었으며, 7호선은 승강장 0.8~29.4 pCi/L 대합실 0.8~31.9 pCi/L이었다. 8호선은 승강장 0.0~2.9 pCi/L, 대합실 0.0~2.7 pCi/L이었다. 대체로 1기 지하철과 2기 지하철의 8호선은 전반적으로 낮은 농도를 보여 양호한 편이었으나, 2기 지하철의 5호선과 7호선은 일부구간을 중심으로 4 pCi/L를 초과하는 역사가 많았다.

표 3은 호선별로 라돈농도의 기하평균과 기하표준편차 및 최대값, 최소값을 나타낸 것이다. 전체 지하철역 라돈농도의 기하평균은 승강장 1.8 pCi/L, 대합실 1.7 pCi/L, 외기 1.4 pCi/L를 나타내었다. 라돈농도의 분포는 정규분포 형태가 아닌 저농도쪽으로 치우치는 분포형태를 보이고 있으므로, 이와 같은 분포형태를 정규화에 접근시켜 평균농도를 산출하기 위해서는 로그변환된 기하평균을 사용하는 것이 합당하다.

겨울철에 수행한 1차 조사결과 1~4호선의 기하평균치는 2.5 pCi/L 미만의 수준을 보였고, 1992년 측정 당시 고농도를 보였던 3호선 일부구간(독립문역에서부터 안국역까지)에서도 4 pCi/L를 조금 상회하는 수준을 보였다. 겨울철 실험에서는 2기 지하철(5, 7, 8

호선)에 대한 조사가 수행되지 않았으며, 1, 2기 지하철 중 운행되고 있는 전지하역사에 대해 봄철 측정을 수행한 결과 대부분 호선의 기하평균치는 2 pCi/L 미만의 수준을 보였으며, 5호선은 승강장 2.3 pCi/L, 대합실 2.1 pCi/L, 7호선은 승강장 4.5 pCi/L, 대합실 4.4 pCi/L를 보였다. 또한, 전체 175개 역사 중 10%이상의 역사에서 4 pCi/L 이상이 검출되었다. 1단계 측정결과 고농도 라돈이 검출된 5호선의 7개역(충정로, 서대문, 광화문, 종로3가, 을지로 4가, 동대문운동장, 청구)과 7호선의 9개역(노원, 중계, 하계, 공릉, 태릉입구, 먹골, 중화, 상봉, 면목)에 대해 측정횟수를 증가시키며 정밀실험에 착수하였다.

5호선의 경우 충정로역부터 청구역까지의 (충정로, 서대문, 광화문, 종로3가, 을지로4가, 동대문운동장, 청구) 고농도를 보이는 구간에 대해 총 6회에 걸쳐 주기적인 실험(계절별 정기실험 3회 포함)을 수행하였으며, 이 중 4개 역사(광화문, 종로3가, 을지로4가, 동대문운동장)에 대해 총 5회의 전일실험을 수행하였다. 1998년 3월 19일 광화문역에서 10분씩 총 42회 조사한 결과 승강장의 평균농도는 7.4 pCi/L였으며, 동년 5월 25일 총 56회 재조사한 결과, 승강장의 평균농도는 7.1 pCi/L로 라돈농도가 어느 정도 일정하게 조사되었다. 한편 종로3가역에서는 총 65회 조사한 결과 승강장의 평균농도는 10.7 pCi/L였으며, 을지로4가역에서도 총 70회 조사한 결과 승강장의 평균농도는 5.4 pCi/L였으며, 마지막으로 동대문 운동장역에서는 총 49회 조사한 결과 승강장의 평균농도는 5.4 pCi/L였다.

7호선 9개 역사의 경우 총 7회에 걸쳐 주

표 3. 서울시 지하철 중 지하역사에서의 라돈농도

	1호선		2호선		3호선		4호선		5호선		7호선		8호선		총계					
	승강 대합	외기	승강 대합	외기	승강 대합	외기	승강 대합	외기	승강 대합	외기	승강 대합	외기	승강 대합	외기						
97- 겨울	기하평균	2.05	1.78	2.38	2.30	2.16	1.88	2.06	2.08	2.43	2.19	2.01	미측정		2.14					
	기하표준편차	1.74	1.68	1.33	1.50	1.59	1.56	1.43	1.69	1.56	1.38	1.60			1.60					
	최대값	4.00	3.10	4.00	4.90	5.08	4.36	5.44	3.28	5.97	6.33	3.28			6.33					
	최소값	0.76	0.76	1.48	0.76	0.58	0.40	0.58	0.11	0.94	0.58	0.76			1.30	0.11				
측정역사수	9	9	9	36	36	36	36	29	29	21	21	21	95							
98- 봄	기하평균	1.07	1.25	1.13	1.59	1.25	1.15	1.28	1.16	1.60	1.15	1.02	2.25	2.07	4.53	1.74	1.55	1.59		
	기하표준편차	1.90	1.59	1.62	1.55	1.73	2.08	2.34	2.16	1.71	1.56	1.81	1.66	2.03	2.02	3.00	2.73	1.31	1.46	
	최대값	1.66	2.38	2.20	3.82	3.10	2.74	5.26	4.36	5.08	3.64	3.64	2.02	9.03	11.73	29.36	31.87	2.92	2.74	31.87
	최소값	0.22	0.58	0.58	0.58	0.00	0.00	0.11	0.11	0.40	0.00	0.22	0.22	0.58	0.29	0.94	1.12	0.00	0.76	0.00
측정역사수	9	9	9	35	35	35	29	29	29	21	21	21	50	50	18	18	13	13	175	
98- 여름	기하평균	1.49	1.15	0.82	0.98	1.12	1.01	1.23	1.27	1.03	1.58	1.19	1.01	1.55	1.35	2.60	2.49	0.95	0.72	1.26
	기하표준편차	1.52	1.54	1.81	2.00	1.72	1.64	3.19	2.09	2.24	2.36	2.99	1.98	2.12	2.25	1.95	2.19	1.67	2.34	2.26
	최대값	3.01	2.22	1.58	3.01	2.69	2.06	5.25	4.77	3.17	7.97	6.21	3.17	6.37	8.45	10.84	11.96	1.90	1.74	11.96
	최소값	0.62	0.46	1.58	0.00	0.00	0.30	0.07	0.23	0.00	0.30	0.07	0.30	0.14	0.07	1.26	0.78	0.00	0.00	0.00
측정역사수	9	9	9	35	35	35	29	29	29	21	21	21	50	50	18	18	13	13	175	
98- 겨울	기하평균	1.09	1.58	1.46	1.65	1.16	1.27	2.32	2.10	1.83	2.22	1.63	1.30	2.17	2.30	3.16	3.38	1.65	1.52	1.83
	기하표준편차	2.20	1.53	1.51	1.62	1.62	1.67	1.72	1.56	1.72	1.71	1.87	1.87	2.32	1.86	2.21	1.74	1.53	1.55	1.97
	최대값	2.22	3.01	2.85	4.13	4.13	3.97	5.09	5.57	3.81	6.85	4.61	4.61	11.16	14.84	10.52	9.08	2.69	2.69	14.84
	최소값	0.14	0.62	0.78	0.62	0.62	0.30	0.94	0.94	0.46	0.62	0.46	0.46	0.14	0.94	0.78	1.42	0.78	0.94	0.07
측정역사수	9	9	9	36	36	36	29	29	29	21	21	21	50	50	17	17	13	13	175	

(단위 : 기하평균(pCi/L), 기하표준편차(무차원), 최대값(pCi/L), 최소값(pCi/L), 측정역사(개))

기적인 실험(계절별 정기실험 3회 포함)을 수행하였으며, 봄철 측정 시 최고농도를 보인 공릉역과 태릉입구역의 경우 각기 2회에 걸쳐 전일조사(역사별 10분간 28회 측정)를 실시하였다. 봄철 측정 시 공릉역과 태릉입구역의 경우 승강장에서 각각 24.5 pCi/L, 29.4 pCi/L를 보였으며, 대합실에서는 각각 31.9 pCi/L, 16.1 pCi/L를 보여 측정역사 중 가장 높은 라돈 농도가 관찰되었었다.

측정결과 몇 가지 흥미로운 사실을 발견할 수 있었다. 우선, 1992년도 이전만 하여도 3호선의 4개 역사(독립문, 경복궁, 안국역, 종로3가)가 10 pCi/L가량의 고농도를 보였으나, 최근의 조사결과 최고 6 pCi/L 미만으로 조사되었으며, 위치나 계절에 따라 2 pCi/L를 초과하지 경우도 많았다. 즉, 1992년 당시 3호선에서는 독립문에서 종로3가까지 4개 역사에서 집중적으로 높은 라돈농도가 측정되었는데, 가장 높은 라돈농도가 측정된 3호선의 안국역은 대합실, 승강장, 역무실 각각 10.7 pCi/L, 8.5 pCi/L, 8.9 pCi/L 이었다. 또한 종로 3가역의 대합실, 승강장, 역무실에서 라돈농도도 각각 9.6 pCi/L, 10.3 pCi/L, 6.0 pCi/L 이었다.<sup>3)</sup> 하지만, 3호선의 하단을 통과하는 5호선 역사(충정로, 서대문, 광화문, 종로3가, 을지로4가, 동대문운동장)가 건설된 후, 이들 5호선 역사에서 예전의 3호선에서 검출되었던 수준의 고농도가 다시 출현하였다. 1992년도 당시 본 연구팀은 지하철의 하단을 지나는 지하수가 1,470~9,689 pCi/L의 고농도를 보여 지하철에서의 라돈 오염원이라고 최종 결론을 내린 바 있다.<sup>3)</sup> 실내 라돈 농도는 실내외의 압력차, 건물 이용자의 습관, 온도와 습도, 환기 정도 등의 주요변수가

복합적으로 작용하여 변화하기 때문에 정확한 오염원을 추정하기에는 어려움이 있지만,<sup>3)</sup> 그 당시 오염원이 확인되어 저감방법을 쉽게 도출할 수 있었다. 이번 1998년도 조사시 3호선의 농도가 낮게 측정된 원인은 2기 지하철 건설로 지하수면이 하강하여 이에 따른 고농도 라돈의 전이가 발생한 것으로 해석되었다.

흥미로운 또 다른 사실은 7호선의 일부역사에서 나타났다. 지하철 7호선역의 일부역사(노원, 중계, 하계, 공릉, 태능, 먹골, 중화, 상봉, 면목)는 1998년 5월 2일 집중호우로 인해 중랑천이 범람하는 사고로 침수되었다. 7호선 역사에 대한 라돈조사는 5월 13일 이후에 이루어졌는데, 공교롭게 7호선 전체역사 중 침수역사에서만 고농도 라돈이 검출되었으며, 그 밖의 역사에서는 2 pCi/L가량의 농도가 측정되었다. 침수 이전에는 라돈조사가 없었기 때문에 침수 이전에도 농도가 높았는지 또한 침수로 인해 농도가 높아졌는지는 판단할 수 없었다. 하지만, 이들 역사는 침수로 인해 한때 운행이 중지되었고, 환기설비 역시 가동이 중지된 상태였다. 특히, 7월 6일 공릉 및 태릉입구역에서의 시간별 정밀조사시 최고 41.4 pCi/L까지 검출되었는데, 이는 7월 3일 서울지역에 내린 160 mm의 집중강우로 수압에 의한 토양압 상승으로 농도가 급상승한 것으로 사료되었다. 7호선의 경우 라돈오염원의 명확한 확인이 요망되었다.

1998년 7월 6일 이후 고농도를 보인 5호선과 7호선 일부구간에서는 대대적인 환기와 청소시 허드렛물로 사용하던 기존의 지하수를 수돗물로 대체하는 등 라돈 농도의 저감을 위해 노력하였는데, 7호선 구간 중 고농

도를 보였던 공릉역과 태릉입구역을 보면, 승강장의 경우 각각 26.2 pCi/L에서 5.8 pCi/L, 25.0 pCi/L에서 7.6 pCi/L로 78 %와 70 %의 저감효과를 보았으며, 대합실의 경우 각각 26.7 pCi/L에서 6.0 pCi/L, 22.6 pCi/L에서 5.6 pCi/L로 78 %와 75 %의 저감효과를 보는 등 70 % 이상의 저감효과를 얻을 수 있었다.

(2) 계절별 라돈농도의 변화

전체 지하철 역 175개를 대상으로 라돈농도의 계절별 추이를 살펴보았다. 겨울철 측정은 1997년 12월 19일부터 1998년 1월 10일까지 수행하였으며, 봄철 측정은 1998년 3월 23일부터 4월 19일까지, 여름철 측정은 1998년 8월 7일부터 9월 11일까지, 가을철 측정은 10월 3일부터 11월 22일까지 계절별로 조사하였다. 상기 표 3을 보면, 겨울철 > 가을철 > 봄철 > 여름철의 순서대로 난방으로 인해 외기와와의 환기가 비교적 덜한 겨울철에 가장 높은 기하평균을 나타냈으며, 반대로

여름철이 가장 낮게 나타났다. 외기에서의 라돈농도는 실내보다 무척 낮으며, 실내의 라돈농도는 외기의 유입으로 희석되어 낮아질 수 있다. 외기의 공기는 환기장치에 의한 강제환기와 기온이나 압력 차이에 의한 자연 환기에 의해 유입되는데, 일반적으로 건물 내부의 압력은 일반 대기 중보다 5~10 Pa 가량 낮으며, 특히 여름철에 가장 낮은 것으로 알려져 있다.<sup>30)</sup> 그림 1은 175개 지하역사에서 측정된 라돈 농도의 분포도로서, 라돈 농도가 4 pCi/L 이상을 나타내는 역은 겨울철에 총 95개 역사 중 15 % (14개역), 봄철에 총 175개 역사 중 12 % (21개역), 여름철에 총 175개 역사 중 8 % (14개역), 가을철에 총 175개 역사 중 13 % (23개역)을 나타내었다. 또한 라돈농도가 8 pCi/L 이상을 나타낸 역은 겨울철에는 없었으며, 봄철과 가을철에 각각 6 % (11개역), 3 % (6개역), 여름철에 2 % (3개역)을 나타내었다. 이러한 결과는 Miles and Algar에 의해서 조사된 실

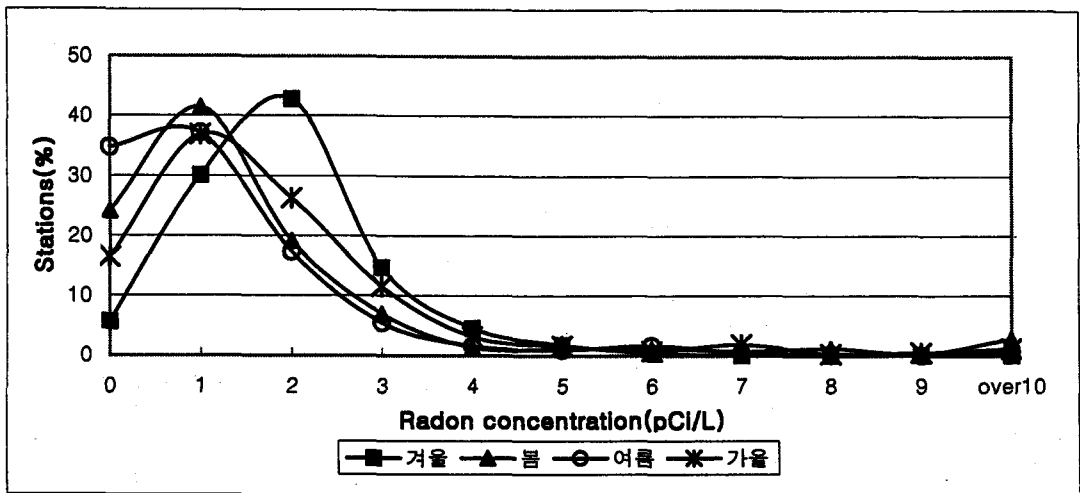


그림 1. 서울시 지하철 중 지하역사에서의 라돈농도의 확률분포도

내의 계절별 변화 양상과 유사하였다.<sup>35)</sup> 겨울철 라돈농도가 높게 나타난 이유는 여름철에 환기장치의 가동이 다른 계절보다 집중적으로 이루어졌기 때문으로 사료된다. Crameri and Burkart는 실내라돈과 냉해중의 농도조사 과정에서 환기량이 증가할 수록 라돈의 농도는 감소된다고 보고한 바 있다.<sup>18)</sup>

### (3) 지하철 라돈의 장단기 저감방안

선진외국의 경우 면적이 작은 주택 및 학교교실에 대해 라돈조사가 주로 수행되었다. 따라서 저감방안 및 측정법도 대부분 이들 대상지역에 한정되어 개발되었기 때문에 수천 평에 달하는 지하역사와는 다를 수 있다. 하지만, 주요 저감방안에 대한 원리는 동일하므로 지하역사에 응용하여 적용할 수 있다. 지하철에서의 라돈농도는 여러 가지 인자에 의해 변화할 수 있다. 열차의 운행 빈도가 라돈농도에 영향을 주는 것으로 생각되며, PTV(Piston Type Ventilation) 현상도 밀접한 관련이 있을 것으로 사료되었다. 라돈의 이동현상에 영향을 주는 요인 중 습도는 라돈의 농도와 약한 비례관계를 보인다.<sup>4)</sup> <sup>36)</sup>

본 연구팀은 서울시 지하역사에 대한 라돈농도를 조사하는 과정에서 고농도의 라돈이 검출되는 역사에 대해 오염원 추정을 하여 장단기 오염 저감방안을 제시한 바 있다. 현재 철도공사는 이 저감방안을 선별적으로 채택하여 상당한 농도 저감을 보고 있다. 즉, 봄철 측정 당시 고농도 라돈이 검출된 지하역사는 모두 지하수를 사용하여 청소를 함으로서 라돈가스를 확산시키고 있었는데, 이를 수돗물 또는 라돈가스가 완전히 빠진 지하수로 대체함으로써 라돈농도를 저감시켰다. 추후 지하수 집수조를 개선하고 지하수의 역내 유입을 차단할 때 농도는 저농도로 안정화될

수 있을 것으로 사료된다. 현재 지하철에는 다량의 지하수가 방출되고 있는 바, 이를 실내에서 경제적으로 활용하기 위해서는 라돈을 제거하고 사용하는 방안을 강구하여야 한다. 라돈의 반감기가 짧은 현상을 활용할 수도 있으며, 간단한 폭기 방법을 활용하여 라돈을 제거할 수도 있다.

또한, 가압식 환기법을 단기적으로 수행할 때 라돈농도 저감이 이루어질 수 있다. 장기적으로는 역사내 공조시스템을 최대한 활용하여 실내공기의 흐름패턴을 조사하며 역사별 고유한 저감법을 개발하여야 하고, 한편 감압식 환기법도 고려하여야 한다. 직원이 장시간 체류하는 역무실의 경우, 출입문은 항상 닫아야 하며, 실내 금연, 에어컨 설치 및 소형 전기집진기 설치로 라돈농도를 크게 낮출 수 있다.

실제, 1992년도에 고농도 라돈농도를 보였던 안국역을 대상으로 환기조건을 달리하여 라돈농도를 조사한 적이 있다.<sup>3)</sup> 당시, 환기에 의한 저감대책을 마련하기 위해, 1) 배기와 급기를 모두 가동한 경우 2) 급기를 중단하고, 배기만 가동한 경우, 3) 급기를 가동하고, 배기를 중지한 경우, 4) 배기와 급기 모두 중지한 경우 등 4가지 경우에 대하여 조사하였다. 급기만을 가동하였을 때 라돈농도가 가장 낮게 측정되었고, 배기만을 가동하였을 때 가장 높게 측정되었다. 이는 급기만을 가동한 경우 라돈농도의 희석 효과가 나타났기 때문이며, 배기만을 가동하였을 때는 지하역내의 부압에 의해 라돈의 방출확산이 활발하였기 때문이다.<sup>32)</sup> 따라서, 배기로 인한 감압시 농도의 증가현상을 볼 수 있었고, 급기로 인한 증압시 농도감소 현상을 볼 수 있었다. 단순히 내부의 공기를 외부로 빼내는

것보다는, 외부의 공기가 내부로 유입될 때 라돈농도를 낮추는데 효과적으로 사료되었다. 하지만, 이때 고려해야할 중요한 점은 라돈을 제외한 여타 오염물질의 거동과약이다. 급기를 위주로 한 라돈의 저감방안은 기타 오염물질의 실외에서 실내로의 유입을 심화시킬 수 있다. 실제 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> 등은 거의 대부분 실외에서 지하역내로 유입되고 있으므로, 라돈의 저감방안을 강구할 때, 유출입되는 모든 오염물질의 상대적 위해성 평가가 수반되어야 한다. 즉, 급배기의 정도와 모든 오염물질들의 거동이 함께 고려되어야 한다.

#### 4. 맺음말

라돈농도의 측정결과 1997년 12월부터 1998년 11월까지 전체 지하철 역사에서의 라돈 기하평균농도는 승강장 1.83 pCi/L, 대합실 1.65 pCi/L, 외기 1.35 pCi/L로 나타났으며, 5호선 일부역과 7호선 침수역을 제외하고 서울시 대부분 지하철역에서의 라돈농도는 우려할 만한 수준은 아니었다. 계절별 라돈농도의 경향은 여름철이 가장 낮은 농도(1.26 pCi/L)를 보였다.

라돈은 확실한 위해성 물질이지만, 선진외국에서 이미 오랜 동안 연구되고 사례별 저감방안이 속속 개발되어 더 이상 공포대상은 아니다. 또한, 측정 및 제어방법 역시 손쉽고 저감비용도 저렴하다. 최근 국내에서 라돈에 대한 공포분위기의 확산은 단지 환경오염에 대한 정보 및 교육이 미비하였기 때문으로, 이를 해결하기 위해서는 민간환경단체의 역할이 증폭되어야 하며, 정부는 환경오염에

적극적인 자세를 보여야 한다. 특히, 최근 많은 환경업무가 지자체에 이관되고 있어 지자체 환경공무원의 전문성이 각별히 요망된다. 지하철 라돈오염은 라돈오염의 특별한 사례이지만, 라돈에 대한 경각심과 관심은 지속되어야 한다. 우리나라의 경우 전국적인 측정자료가 미미하고 공개사례가 적으나, 일부 지하건축물, 주택, 비닐하우스 등에서 안심할 수 없는 수준의 라돈이 검출되고 있다. 전국적인 라돈조사와 기초연구가 절실한 시점이다.

#### - 참고문헌 -

1. 김윤신(1989) 서울시 일부 지역에서의 실내라돈 농도에 관한 조사, 한국환경위생학회지, 15(1), 11-18.
2. 김윤신, 김동술, 이주형(1991) 실내의 공기의 유해평가 관리 및 기준치 개발에 관한 연구, KOSEF 89-0705-03, 한국과학재단.
3. 김동술, 김윤신, 김신도, 신용배, 김성천, 유정석(1993) 서울시 지하철역내의 라돈 농도분포 및 저감대책, 한국대기보전학회지, 9(4), 271-277.
4. Kim, D.S. and Y.S. Kim(1993) Distributions of Airborne Radon Concentrations in Seoul Metropolitan Subway Station, Health Physics, 65(1), 12-16.
5. Kunz, C.O.(1988) Indoor Radon: Source Characterization, Environ. Progress, 7(4), 236-240.
6. Crawford Brawn, D.J.(1992) Cancer Risk From Radon, J. AWWA. 77-81.

7. Abumurad, K., B. Al-Bataina, A. Ismail, M. Kullab and A. Al-Eloosy(1997) A survey of Radon Levels in Jordanian Dwellings During an Autumn Season, *Radiation Protection Dosimetry*, 69(3), 221-226.
8. Arpesella, C., B. B. Bam, A. Bassignani, S. Cecchini. G. Colombo, H. Dekhissi, R. Fresca Fantoni, G. Giacomelli, L. Lembo, G. Mandrioli, L. Patrizii, C. Sartorio, P. Serra, V. Togo, and E. Viela(1997) Radon Measurements in the Gran Sasso Underground Laboratory, *Health Phys.*, 72(4), 629-632.
9. Levesque, B., D. Gauvin, R.G. McGregor, R. Martel, S. Gingras, A. Dontigny, W. B. Walker, P. Lajoie, and E. Letourneau (1997) Radon in Residences : Influences of Geological and Housing Characteristics, *Health Phys.*, 72(6), 907-914.
10. Pinza, C., J.H. Armast, and A. Proffijn (1997) Radon Concentration in Dwellings of Lanzarote(Canary Islands), *Radiation Protection Dosimetry*, 69(3), 217-220.
11. Yu, K.N., E.C.M. Young, M.J. Stokes, Z.J. Guan, and K.W. Cho(1997) A Survey of Radon and Thoron Progeny for Dwellings in Hong Kong, *Health Phys.* 73(2), 373-377.
12. U.S.EPA(1986) *A Citizen's Guide to Radon-What It Is and What To Do About It*. EPA-86-004.
13. Bayes, J.C., E. Gomez, F. Garcias, M. Casas, and V. Cerda(1996) Radium Determination in Mineral Waters, *Appl. Radiat. Isot.*, 47(9/10), 849-853.
14. Duenas, C., M.C. Fernadez, J. Carretero, and E. Liger(1996) Measurement of Rn-222 In Soil Concentrations in Interstitial Air, *Appl. Radiat. Isot.*, 47(9/10), 841-847.
15. Farid S.M.(1996) Measurements of Radon Concentrations in Groundwater from Swaziland Using CG-39 Nuclear Track Detectors, *Appl. Radiat. Isot.*, 47 (3), 383-385.
16. Gesell T.F. and H.M. Prichard(1980) The Concentration of Radon in Tap Water to Indoor Radon Concentrations, in *Natural Radiation Environmental III*, Edited by T.F. Gesell and W.M. Lowder, U.S. Department of Energy CONF-780422, 1347.
17. Hess, C.T., J.K. Korsah, and C.J. Einloth(1987) Radon in Houses Due to Radon in Potable Water, *Radon and Its Decay Product*, Edited by P.K. Hopke, ACS Symp. Ser. 331.
18. Crameri, R. and W. Burkart(1989) Radon Problem, *Radiat. Phys. Chem.*, 34:2:251-259.
19. Quindos, L. S., G. J. Newton, and M. H. Wilkening(1989) Estimation of Indoor Rn-222 from Concrete, *Health Physics*, 56(1), 107-109.
20. Wollenberg, H.A.(1984) Naturally Occuring Radioelements and Terrestrial



- Gamma-Ray Exposure Rates : An Assessment Based on Recent Geochemical Data, Report LBL-18714, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, Calif.
21. Nazaroff, W. W., S. M. Dolje, A. V. Nero, and R. G. Sextro(1987) Potable Water as a Source of Airborne Rn-222 in U.S. Dwellings: A Review and Assessment, *Health Physics*, 52(3), 281-295.
  22. Hess, C.T., J. K. Korsah, and C. J. Einloth(1987) Radon in Houses Due to Radon in Potable Water, *Radon and Its Decay Product*, Edited by P.K. Hopke, ACS Symp. Ser. 331.
  23. U.S.NIH(1996) NIH News Release, <http://www.nih.gov/news/pr/dec96/nci-31.htm>.
  24. U.S.EPA(1998) The Health Effects of Exposue to Indoor Radon, <http://www.epa.gov/iaq/radon/public.html>.
  25. U.S.EPA(1998) A Citizen's Guide to Radon <http://www.epa.gov/iaq/radon/citguide.html>
  26. U.S.EPA(1998) A Physician's Guide-radon <http://www.epa.gov/iaq/radon/physic.html>
  27. U.S.EPA(1998) Radon : A Technical review <http://www.epa.gov/camp-risk/nccr/radon.htm>
  28. Shimo, M., T. Inda, and Y. Ikebe(1987) Intercomparison of Different Instruments That Measure Radon Concentration in Air, *Radon and Its Decay Product*, Edited by P.K. Hopke, ACS Symp. Ser. 331.
  29. U.S.EPA(1998) RPP Radon Measurement Method Definitkons <http://www.epa.gov/radonpro/methods.htm>
  30. Hines, A.L., T.K. Ghosh., S.K. Loyalka., and R.C.Jr. Warder(1993) *Indoor Air Quality and Control*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
  31. IAR(1992) EPA Develops Preliminary Radon Potential Map of The U.S., 27.
  32. Lao, K.Q.(1990) *Controlling Indoor Radon*; measurement, mitigation and prevention, Van Nostrand Reinhold Inc., New York.
  33. Kershner, C.J. and E.T. Burgess(1988) *Phase Shifted Feedback Electrometer for Pulsed Ion Chamber*, Manual for Model R210F, Femto-Tech Inc., U.S.A.
  34. Field, R.W. and B.C. Kross (1990) Field Comparison of Several Commercially Available Radon Detectors, *AJPH.*, 80(8)926-930.
  35. Miles, JCH and RA. Algar(1988) Variation in Radon-222 Concentrations, *J. Radiol. Prot.*, 8(2)103-105.
  36. Singh, M., R.C. Ramola, S. Singh and H.S. Virk(1990) Influence of Moisture Content on Radon Diffusion in Soil. *Nucl. Geophys.*, 4(4)479-482.