

군부대 시설 및 지하철 역사 주변 지하상가의 측정농도와 노출시간을 이용한 실내에서의 라돈 위해성 평가

공진석·김영희[†]

호서대학교 벤처대학원 융합공학과

Indoor Radon Risk Assessment by Applying Measurement Concentrations and Exposure Times for Military Facilities and Underground Shopping Malls near Subway stations

Jin Seok Kong and Younghee Kim[†]

Department of Convergence Technology, Graduate School of Venture, Hoseo University

ABSTRACT

Objectives: The objective of this study was to conduct risk assessment using indoor radon concentration and exposure times.

Methods: The target facilities were military facilities before and after the application of radon reduction processes and underground commercial facilities in major subway stations in Seoul. Indoor radon concentrations were measured by passive sampler.

Results: Radon concentrations in 13 military facilities were initially higher than the guidelines, but the levels were below guidelines after the application of radon reduction processes. Underground shopping mall radon concentrations near subway stations in Seoul satisfied the guidelines. However, indoor radon effective doses after radon reduction processes in some military facilities and those in underground shopping malls belonged to International Commission on Radiological Protection (ICRP) groups needing control management.

Conclusion: Indoor radon management requires risk assessment data that takes into account working time (or residence time) in addition to management according to concentration guidelines.

Keywords: Radon risk assessment exposure time

I. 서 론

토양이나 암석 내에서 생성되는 라돈은 완전히 붕괴될 때까지 그곳에 머무르게 된다. 그런데, 암석 표면의 공극내에서 물에 용해된 라돈은 붕괴되지 않고 그 상태를 유지하게 된다.¹⁾ 이렇게 용해된 상당량의 라돈은 실내 공기 내로 방출하면서 주변으로 확산하게 된다. 의학적으로 기준치 이상의 라돈을 마시거

나 호흡했을 경우, 인체에 치명적인 폐암을 유발시킨다는 것이 밝혀졌다.^{2,3)} 라돈은 인체의 감각기관으로는 인지할 수 없다. 세계보건기구에서는 전 세계 폐암의 3~14%가 이 라돈 노출에 의한 것이라고 보고하고 있다.⁴⁾

호흡을 할 때, 라돈과 그 자핵종들이 호흡기 속으로 들어가서 대부분은 내쉬는 숨에 의해서 다시 나오지만, 일부는 기관지 및 폐에 달라붙은 후 붕괴를

[†]Corresponding author: Nambu Beltway 2497, Seoul Korea, Tel: +82-2-2059-2354, Fax: +82-2-2055-1405, E-mail : yhkim514@hoseo.edu

Received: 28 September 2016, Revised: 17 October 2016, Accepted: 18 October 2016

하게 된다. 이 과정에서 알파선이란 방사선이 나오게 되는데 이것이 폐 조직에 손상을 주기도 하는 것이다. 이와 같이 폐조직이 지속적으로 손상되면 폐암을 일으킬 수 있는 것이다.⁵⁾

김강석 등은 서울/수도권에 거주하는 성인 1,400명을 대상으로 환경오염(주로 외부 대기오염)과 이로 인한 건강 위해에 대한 인식을 파악하기 위한 설문 조사에서, 하루생활의 95.4%를 실내에서 생활하고 있다고 응답했음에도 실내공기 오염이 건강에 가장 큰 위협을 준다고 생각하는 경우는 5.4%에 불과해, 실내공기오염에 대한 주민들의 인식이 부족함을 보고하고 있었다.⁶⁾

라돈 노출에 의한 법규는 1989년에 “지하 공간 환경기준 권고치 설정”으로 라돈의 권고기준을 148 Bq/m^3 (4 pCi/L)로 정하였고, 1996년 “지하 생활 공간 공기질 관리법”에서는 라돈을 오염물질로 규정하였으나 자연 방사능이라 해서 기준설정을 하지 않았지만, 2003년 “다중이용시설 등의 실내공기질 관리법”의 제정으로 라돈의 권고기준이 148 Bq/m^3 (4 pCi/L)로 마련되었다.⁷⁾

우리나라의 경우 라돈조사는 지하철, 건물 지하실, 비닐하우스, 동굴 등에서 일부 대학을 중심으로 수행된 적이 있다. 특히 서울시 일부 지하철 역사에서는 최대 35 pCi/L 의 고농도를 보인 적도 있다. 당시 이들 역사는 화강암 지역에 지어졌으며 지하철 터널과 역사에 지하수가 다량 유입된 상태였고 평소에도 라돈으로 오염된 지하수를 청소할 때와 화장실 물로 사용하고 있었다. 서울시 지하철 역사의 10% 정도는 아직도 4 pCi/L 를 초과하는 것으로 판단되며 오염의 주원인은 지하수이다.⁸⁾

지금까지 실내 라돈에 관한 연구는 대부분 도시지역의 주거, 상업시설 등에 국한되어 수행되어 군부대와 같은 특수시설에 대한 실내라돈 현황을 파악하기에 한계가 있었다.^{9,10)} 또한 위해성 평가를 수행하더라도 일반적인 노출시간을 적용하였을 뿐, 노출시간을 해당 시설에 맞도록 고려하여 평가한 사례를 찾기에 한계가 있었다.^{9,18)}

유의미한 농도의 라돈 노출에 대한 제어방법 중의 하나인 환기는 실내공간에서는 제약이 많기 때문에, 본 연구에서는 군부대와 지하상가에서의 실내 라돈농도 측정자료와 노출시간 적용에 따른 위해성 평가를 그 목적으로 하였다.



Fig. 1. E-PERM, Electret voltage detector and installation

II. 연구방법

실내 라돈 농도 조사를 위해 passive sampler 중 충전막전리함(Electret Ion Chamber ; EIC)방식의 측정기기인 E-PERM(Rad Elec Inc., US)을 사용하였다. E-PERM은 210 ml 용량의 뚜껑달린 small chamber 와 일정 전압이 충전된 Electret으로 구성되어 있으며 Fig. 1에 나타내었다.

Electret의 전압감소량은 37 Bq/m^3 (1 pCi/L)의 ^{222}Rn 농도 하에서 1일 2.5V의 전압이 감소되도록 설계되어, US EPA의 실내 라돈 권고기준인 148 Bq/m^3 (4 pCi/L)의 환경에서 1일 10 V의 전압이 감소되는 특성을 지니고 있다.²²⁾

보통 측정 전의 전압량에서 측정 후의 전압량을 차감한 값을 실내 라돈 농도로 환산하게 된다. Electret의 표면은 습도가 높은 환경에서도 사용 가능하도록 23 mm 두께의 Teflon-PEP(Fluorinated Ethylene Propylene copolymer) 필름으로 제작되어 있다. 실내 공기 중 라돈 농도 단위는 pCi/L 나 Bq/m^3 으로 표시하며, 1 Bq/m^3 은 국제통일 단위계(SI)로 초단 1개의 핵이 붕괴되는 것을 의미하므로 라돈 농도를 Bq/m^3 으로 환산하여 나타낸다. E-PERM의 검출 하한(Lower Limit of Detection ; LLD)은 7 Bq/m^3 이다.

본 연구의 대상 시설은 2014년도 라돈저감시설 사업대상 군부대 시설(2015년 측정)과 서울지역 주요 지하철 역사 주변 지하상가를 대상(2016년 8월~9월 측정)으로 하였다. 실내공간의 라돈 농도는 겨울이 다른 계절에 비해 높은 것으로 알려져 있는데, 군부대 시설에서의 측정 시점을 2015년 여름에 수행한 이유는 부대의 고유기능을 방해하지 않는 시점을 택한 원칙 때문이었다.

군부대 시설은 국방부의 내부 사전조사를 통하여 13개소가 선정되었으며, 서울 지하철 역사의 쇼핑몰은 사전조사를 통하여 유동인구가 많은 4개 시설을 선정하였다. 각 시설에서의 측정위치는 다음과 같다. 실내 라돈 농도는 잠깐의 기류 변화나 습도로 인해 급격히 변동하기 때문에 측정기가 설치된 장소는 US EPA의 설치 매뉴얼²³⁾을 준수하여 창가, 주방, 욕실, 다용도실을 피하고 창, 출입문으로부터 90 cm 이상, 내벽으로부터 30 cm 이상 이격되고 바닥에서 50 cm 이상, 전자기기로부터 1 m 이상(단 고출력 스피커가 있는 방은 설치장소에서 제외) 이격된 장소에 설치하였다. 측정 완료 후 Electret을 E-PERM에서 분리한 뒤 Rad Elec사(US)에서 제공하는 Electret voltage detector를 이용하여 분석하였다. 시료의 개수는 군부대의 경우는 국방시설의 특성상 장소와 시간상의 제약으로 측정지점 당 1회 수행하였으며, 지하철역사 쇼핑몰의 경우는 측정지점 당 3회 측정 후 평균하여 사용하였다.

실내 공기 중 라돈 농도에 대한 연간 유효선량(annual effective dose)²⁴⁾을 구하기 위하여 다음의 식(1)을 이용하였다²⁵⁾:

$$D_{Rn} = C_{EEC} \times K \times T \quad (식 1)$$

여기서, D_{Rn} 은 연간 유효선량(mSv/y), C_{EEC} 는 평형등가농도(equilibrium equivalent concentration, Bq/m³), K 는 전환 계수(nSv/(Bq/m³)), 그리고 T 는 실내 거주 시간(h/y)을 나타낸다. 전환 계수 K 는 ICRP(International Commission on Radiological Protection)에서 권고하는 12 nSv/(Bq/m³)를 이용하였다.²⁵⁾

$$C_{EEC} = F_E \times C_{Rn} \quad (식 2)$$

여기서, F_E 는 평형계수(0.4) 이고 C_{Rn} 는 실내 공간에서 측정된 라돈가스 농도이다(Bq/m³).

실내에서의 일일 평균 체류시간(근무시간)은 보일

러실 15시간, 조리실 14시간, 생활관 13시간, 행정 사무실 12시간, 개인사무실 4시간, 대기실 3시간, 비상근 사무실 3시간, 여군대기실 2시간, 기타 회의실 및 사이버정보방은 1시간 등으로 설정하였다.

III. 측정분석 결과

Table 1에 군부대 내 시설에 대한 저감 시공 전후의 실내라돈 농도 결과를 나타내었다. 전체적으로 저감시공으로 실내라돈의 농도는 94.4~27.4%의 감소 효율을 보였다. A군부대의 경우, 브리핑실이 421.8 Bq/m³로부터 108.8 Bq/m³로, VIP실이 383.9 Bq/m³로부터 144.0 Bq/m³로 저감되었다. 여군대기실이 369.3 Bq/m³로부터 140.9 Bq/m³로, 대기실A가 391.7 Bq/m³로부터 140.9 Bq/m³로, 대기실B가 360.2 Bq/m³로부터 129.3 Bq/m³로 저감되었다. 보일러실

Table 1. Comparison results of indoor radon concentrations between before and after radon reduction processes

name	site	before (Bq/m ³)	after (Bq/m ³)
A camp	briefing room	421.8	108.8
	VIP room	383.9	144.0
	female waiting room	369.3	140.9
	waiting room A	391.7	132.4
	waiting room B	360.2	129.3
	boiler room	712.6	104.9
	waiting room C	271.2	139.2
B camp	dispatch	248.4	140.2
C camp	information office	188.6	124.5
D camp	maintenance workspace	169.4	58.7
	cellar	357.0	49.5
E camp	operating office	165.5	54.0
F camp	dormitory	644.0	141.1
G camp	dormitory	668.7	41.9
H camp	dormitory	150.6	109.4
I camp	consulting room	470.3	75.7
J camp	sergeant major office	1,002.3	96.8
	meeting room	228.6	77.7
K camp	kitchen	1,774.5	99.2
L camp	boiler room	936.0	113.8
M camp	cyber information room	175.5	92.3

Table 2. Results of underground shopping mall radon concentrations near subway stations in Seoul

station	site	concentration (Bq/m ³)
Gangnam Station	underground shopping mall	26.2
Jamsil station	underground shopping mall	34.4
Euljiro Station	underground shopping mall	55.8
Dongdaemun Station	underground shopping mall	50.4

이 712.6 Bq/m³로부터 104.9 Bq/m³ 로, 대기실C가 271.2 Bq/m³로부터 139.2 Bq/m³ 로 저감되었다. B 여단 상황실이 248.4 Bq/m³로부터 140.2 Bq/m³ 로, C여단 정보과가 188.6 Bq/m³로부터 124.5 Bq/m³ 로 저감되었다. D여단 정비반이 169.4 Bq/m³로부터 58.7 Bq/m³ 로, 지하실이 357.0 Bq/m³로부터 49.5 Bq/m³ 로 저감되었다. E사단 운영과가 165.5 Bq/m³로부터 54.0 Bq/m³ 로, F사단 생활관이 644.0 Bq/m³로부터 141.1 Bq/m³ 로 저감되었다. G사단 생활관이 668.7 Bq/m³로부터 41.9 Bq/m³ 로, H사단 생활관이 150.6 Bq/m³로부터 109.4 Bq/m³ 로 저감되었다.

I사단 상담실이 470.3 Bq/m³로부터 75.7 Bq/m³ 로, J포병대 원사사무실이 1,002.3 Bq/m³로부터 96.8 Bq/m³ 로, 회의실이 228.6 Bq/m³로부터 77.7 Bq/m³ 로 저감되었다. K사단 조리실이 1,774.5 Bq/m³로부터 99.2 Bq/m³ 로, L대대 보일러실이 936.0 Bq/m³로부터 113.8 Bq/m³ 로, M여단 사이버정보방이 175.5 Bq/m³로부터 92.3 Bq/m³ 로 저감되었다.

Table 2에 서울 지하역사 주변 지하상가 점포 내에서의 라돈농도 결과를 나타내었다. 강남역 지하상가 점포 내 농도가 26.2 Bq/m³, 잠실역 지하상가 점포 내 농도가 34.4 Bq/m³, 을지로역 지하상가 점포 내 농도가 55.8 Bq/m³, 동대문역 지하상가 점포 내 농도가 50.4 Bq/m³ 로 분석되었다.

Fig. 2에 군부대 시설 라돈 농도를 나타내었다. 군부대의 경우, 시공 전에는 169.4 Bq/m³로부터 1,774.5 Bq/m³로서 “다중이용시설 등의 실내공기질 관리법”의 라돈 권고기준치인 148 Bq/m³ 을 초과하였으나, 저감시공 후에는 모두 라돈 권고기준치 미만으로 나타났다. Fig. 3.를 보면 지하역사 상가 점포 내부 라돈 농도 또한 군부대 시설의 저감 후와 마찬가지로 실내 권고기준치 미만으로 나타남을 볼 수 있었다.

(식 1)과 (식 2)를 사용하여 시공전후 군부대 시설

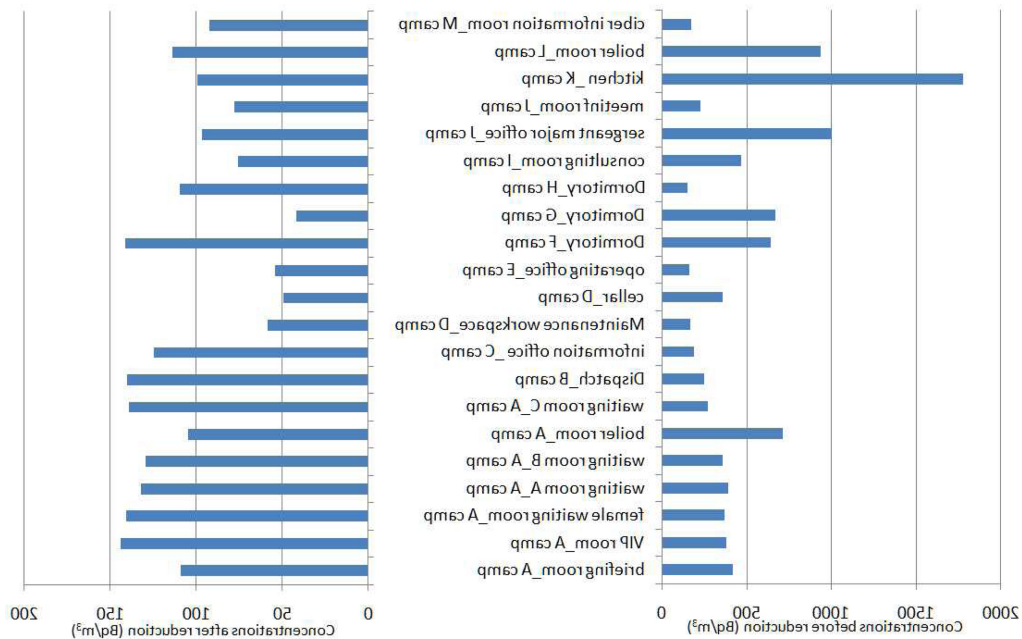


Fig. 2. Indoor radon concentrations in military sites

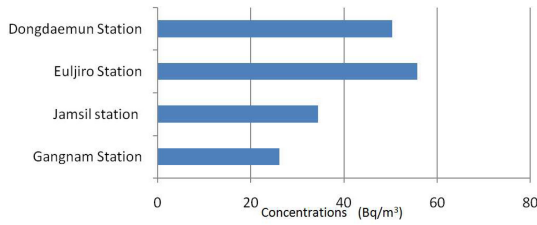


Fig. 3. Underground shopping mall radon concentrations near subway stations in Seoul

Table 3. Comparison results of indoor radon effective doses between before and after constructions of the radon reduction facilities (unit : mSv/y)

name	site	daily average retention time	before after	
			before	after
A camp	briefing room	1	1.5	0.4
	VIP room	1	1.3	0.5
	female waiting room	2	2.6	1.0
	waiting room A	3	4.1	1.4
	waiting room B	3	3.8	1.4
B camp	boiler room	15	37.5	5.5
	waiting room C	3	2.9	1.5
B camp	dispatch	12	10.4	5.9
C camp	information office	12	7.9	5.2
D camp	maintenance workspace	12	7.1	2.5
	cellar	1	1.3	0.2
E camp	operating office	12	7.0	2.3
F camp	dormitory	13	29.3	6.4
G camp	dormitory	13	30.5	1.9
H camp	dormitory	13	6.9	5.0
I camp	consulting room	3	4.9	0.8
J camp	sergeant major office	4	14.0	1.4
	meeting room	1	0.8	0.3
K camp	kitchen	14	87.0	4.9
L camp	boiler room	15	49.2	6.0
M camp	cyber information room	1	0.6	0.3

과 지하철 지하상가에서의 실내 라돈 연간 유효선량을 계산하여 Table 3에 나타내었다. 군부대의 경우, 라돈저감시설 시공 전 87.0~0.6 mSv/y 로부터 시공 후 6.4~0.2 mSv/y로 저감되었으며, 지하철 지하상가의 경우에는 2.3~1.1 mSv/y 로 산정되었다.

A군부대의 경우, 브리핑실이 1.5 mSv/y 로부터 0.4 mSv/y 로, VIP실이 1.3 mSv/y 로부터 0.5 mSv/y 로

저감되었다. 여군대기실이 2.6 mSv/y 로부터 1.0 mSv/y 로, 대기실A가 4.1 mSv/y 로부터 1.4 mSv/y 로 대기실B가 3.8 mSv/y 로부터 1.4 mSv/y 로 저감되었다. 보일러실이 37.5 mSv/y 로부터 5.5 mSv/y 로, 대기실C가 2.9 mSv/y 로부터 1.5 mSv/y 로 저감되었다. B여단 상황실이 10.4 mSv/y 로부터 5.9 mSv/y 로, C여단 정보과가 7.9 mSv/y 로부터 5.2 mSv/y 로 저감되었다. D여단 정비반이 7.1 mSv/y 로부터 2.5 mSv/y 로, 지하실이 1.3 mSv/y 로부터 0.2 mSv/y 로 저감되었다. E사단 운영과가 7.0 mSv/y 로부터 2.3 mSv/y 로, F사단 생활관이 29.3 mSv/y 로부터 6.4 mSv/y로 저감되었다. G사단 생활관이 30.5 mSv/y 로부터 1.9 mSv/y 로, H사단 생활관이 6.9 mSv/y 로부터 5.0 mSv/y 로 저감되었다. I사단 상담실이 4.9 mSv/y 로부터 0.8 mSv/y 로, J포병대 원사사무실이 14.0 mSv/y 로부터 1.4 mSv/y 로 저감되었다. 회의실이 0.8 mSv/y 로부터 0.3 mSv/y 로, K사단 조리실이 87.0 mSv/y 로부터 4.9 mSv/y 로 저감되었다. L대대 보일러실이 49.2 mSv/y 로부터 6.0 mSv/y 로, M여단 사이버정보방이 0.6 mSv/y 로부터 0.3 mSv/y 로 저감되었다. 지하철 지하상가에서의 실내 라돈 연간 유효선량의 결과는 강남역 지하상가 점포 내 유효선량이 26.2 mSv/y, 잠실역 지하상가 점포 내 유효선량이 34.4 mSv/y, 을지로역 지하상가 점포 내 유효선량이 55.8 mSv/y, 동대문역 지하상가 점포 내 유효선량이 50.4 mSv/y 로 산정되었다.

IV. 고 찰

한국원자력 안전기술원에서 수행하여 보고한 서울 지하철 근무자의 라돈 흡입에 의한 연간 유효선량은 일일 근로 시간 8시간, 그리고 일 개월에 173시간으로 가정하여 계산한 결과, 근무자들의 연간 유효선량은 0.23 - 0.73 mSv·y⁻¹ (평균 0.42 mSv·y⁻¹)의 범위로 매우 낮았다고 보고하고 있었다.²⁶⁾

그런데, 본 연구에서 측정된 지하철 역사 주변 상가 점포 내부 농도에 근무시간 12시간을 고려한 후, 지하상가 점포 내 실내 라돈 연간 유효선량이 강남역 점포가 1.1 mSv/y, 잠실역 점포가 1.4 mSv/y, 을지로역 점포가 2.3 mSv/y, 동대문역 점포가 2.1 mSv/y 로 계산되어 지하철 근무자에 비하여 상대적으로 높

게 나타났다.

ICRP는 참조준위를 3등급으로 구분하고 있는데, 5년 평균 1 mSv/y 미만인 첫째 밴드는 피폭자에게는 직접 편익이 없지만 사회에는 편익이 있을 수 있는 피폭(대개 계획피폭)을 개인이 받는 피폭상황에 적용된다. 이 밴드의 제약치와 참조준위는 일반적인 정보와 환경조사나 감시 또는 평가가 있는 상황에 선정될 수 있으며, 개인이 어떤 훈련을 받을 필요는 없지만 관련된 정보는 제공받을 수 있다.²⁷⁾

5년 평균 1 mSv/y부터 20 mSv/y 사이의 둘째 밴드는 개인이 피폭상황에서 직접 편익을 받는 상황에 적용된다. 이 밴드에서는 개인감시나 선량 모니터링 또는 선량평가가 이루어지며, 개인은 훈련을 받고 정보를 제공 받는다. 계획피폭상황의 직무피폭에 대해 설정하는 제약치가 그 예이다. 비정상적으로 높은 준위의 자연 백그라운드 방사선, 혹은 사고 후 재입주 단계에서 피폭상황이 이 밴드에 포함될 수 있다.²⁷⁾

5년 평균 20 mSv/y와 100 mSv/y 사이의 셋째 밴드는 피폭 감축조치가 극단적인 상황에 적용된다. 선량이 100 mSv/y까지 상승하는 경우에는 거의 모든 경우에 대해 방호조치가 정당화될 수 있다고 ICRP는 본다.²⁷⁾

ICRP는 3등급 참조준위를 Table 3의 시공전 연간 라돈 유효선량 자료에 적용하면, 1 mSv/y 미만인 첫째 밴드에 속하는 시설은 J포병대 회의실, M여단 사이버정보방 등 2개 시설이었으며, 1 mSv/y부터 20 mSv/y 사이의 둘째 밴드에 속하는 시설은 J포병대 원사사무실, B여단 상황실 등 14개 시설이었으며, 20 mSv/y와 100 mSv/y 사이의 셋째 밴드는 K사단 조리실, L대대 보일러실 등 5개 시설이었다.

21개 시설 모두 “다중이용시설 등의 실내공기질 관리법”의 라돈 권고기준치인 148 Bq/m³을 초과하였으나, 평균 실내 체류시간을 고려하여 계산한 연간 유효선량을 계산하면 이 중 2개 시설은 피폭자에게는 직접 편익이 없고, 일반적인 정보와 환경조사나 감시 또는 평가가 있는 상황에 선정될 수 있으며, 개인이 어떤 훈련을 받을 필요는 없는 단계에 속했다.

그런데, ICRP는 계획피폭상황에서 직무피폭의 경우 어느 한 해 동안 유효선량이 50 mSv를 초과하지 않아야 한다는 추가 규정을 두었는데, 본 연구에서 K 사단의 조리실의 경우 사병의 복무기간이 1년

Table 4. Results of underground shopping mall radon effective doses near subway stations in Seoul (unit : mSv/y)

station	daily average working time	effective dose
Gangnam Station	12	1.1
Jamsil station	12	1.4
Euljiro Station	12	2.3
Dongdaemun Station	12	2.1

이상을 감안하면 충분히 해 동안 유효선량이 50 mSv 이상으로 피폭될 수 있는 가능성이 높을 것이다.

주목할 것은 군부대의 라돈 저감 시공 후의 연간 유효선량인데, 실내 라돈 농도로는 “다중이용시설 등의 실내공기질 관리법”의 라돈의 권고기준을 만족하고 있었다. 그러나, 21개 시설 중 F사단 생활관, B여단 상황실 등 14개 시설이 ICRP 참조준위 3개 등급 중 2번째 등급(1 mSv/y부터 20 mSv/y 사이)에 속하여 라돈 저감 시공 후에도 개인감시나 선량 모니터링 또는 선량평가가 이루어지며, 개인은 훈련을 받고 정보를 제공 받는 등의 권고를 받는 그룹에 속하였다.

서울 지하철역사 주변 지하상가 점포 내부 라돈 농도는 권고기준을 만족하였으나, Table 4에 나타난 점포 내부 연간 유효선량 분석에서는 4개 역사 점포 모두 ICRP 참조준위 3개 등급 중 2번째 등급에 속하여 개인감시나 선량 모니터링 또는 선량평가가 이루어지며, 개인은 훈련을 받고 정보를 제공 받는 등의 권고 대상 그룹에 속하였다.

V. 결 론

2014년도 라돈저감시설 사업대상 군부대 시설과 생활시설에서의 라돈 위해도를 알아보기 위해 선정한 서울지역 주요 지하철 역사 주변 지하상가를 대상으로 미국 EPA 402-R-92-014 프로토콜을 준수하여 단기측정을 수행한 결과, 라돈 농도 제어활동 후의 군부대 시설과 지하철역사 상가 점포들이 “다중이용시설 등의 실내공기질 관리법”의 라돈 권고기준치인 148 Bq/m³을 만족하였으나, 다수의 시설에서 ICRP (International Commission on Radiological Protection)에서 규정하는 참조준위 중 2번째 밴드에

속하였으므로, 실내 라돈 관리는 농도기준에 의한 관리 외에 근무시간(또는 체류시간)을 고려하여 위해성 평가를 통해 도출된 위해성 평가 결과를 근거로 하는 인체위해성 측면에 있어서의 제도적 관리방안 보완작업이 필요하다고 판단된다.

References

- Lewis C, Hopke P, Stukel J. The solubility of radon in selected perfluorocarbon compounds and water. *Industrial Engineering and Chemical Research* 1987; 26: 356-359.
- Doull J. Risk assessment of radon in drinking water, Washington D.C., National Academy Press, 1999.
- Wilkening M. Radon in the environment, Elsevier; 1987: p 137.
- WHO. Handbook of indoor radon; 2009.
- The Ministry of Environment. Indoor radon reduction guideline; 2010.
- Kim KS, Lee HS, Kong SY, Koo HJ. National survey and policy study on indoor air pollution, Korea Environment Institute; 2001.
- The Ministry of Environment. Indoor air quality management act, such as multi-use facility; 2003.
- The Korean Society for Atmospheric Environment. Radon contamination; 2014.
- Lee CM, Kim YS, Roh YM, Kim KY, Jeon HJ, Kim JC. Radon concentration in various indoor environment and effective dose by inhabitants in Korea. *Journal of Environmental Health Sciences*. 2007; 33(4): 264-275.
- Lee CM, Kim YS, Kim JC, Jeon HJ. Distribution of radon concentration at subway station in Seoul. *Journal of Environmental Health Sciences*. 2004; 30(5): 469-480.
- Zoo DH, Park KH, Jeong HW, Lim HJ, Bok DS, Yun DW, et al. A study on indoor radon concentration among vulnerable households in Korea. *Journal of Environmental Health Sciences*. 2015; 41(2): 61-70.
- Kim SA, Park NW. A Study on indoor radon concentrations in urban area. *Journal of Environmental Health Sciences*. 2002; 28(2) 89-98.
- Kim YS. The Study of Radon concentration according to building of stars. *Journal of Environmental Health Sciences*. 2005; 31(1): 94-98.
- Lee SK, Lee YM, Park JH, Kim SS, Hong GY, Ahn HG, et al. Radon concentration assessment of studio apartments surrounding a university. *Journal of Environmental Health Sciences*. 2013; 39(2): 138-143.
- Kim YS. Indoor Radon concentrations in the Seoul area. *Journal of Environmental Health Sciences*. 1989; 15(1): 11-18.
- Kim YS, Lee CM, Kim HT. A survey of indoor and outdoor radon concentrations by alpha track detector in Korea. *Journal of Environmental Health Sciences*. 2002; 28(5): 71-76.
- Kim YS. Indoor Radon levels in four different areas in Korea. *Journal of Environmental Health Sciences*. 1990; 16(1): 1-7.
- Choi IC, Shin SH, Jo WK. Evaluation of radon levels in various public-access buildings or underground facilities, and their temporal variation in underground facilities. *Environmental Health and Toxicology*. 2009; 23(3): 203-211.
- Jeon JS, Lee JY, Eom SW, Chae YZ. The variation characteristics of indoor radon concentration from buildings with different environment, Seoul. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*. 2011; 27(6): 692-702.
- Baek SA, Lee TJ, Kim SD, Kim DS. Studies on the spatial analysis for distribution estimation of radon concentration at the Seoul area. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*. 2008; 24(5): 538-550.
- Woo KS, Oh SJ, Park HJ, Seo SY, Lee WS, Chung EK, et al. A study on the concentration of radon for house, government office and school in Chungnam area. *Journal of Odor and Indoor Environment*. 2014; 13(1): 73-79.
- Kotrappa P, Dempsey J, Hickey J, Stieff L. *An electret passive environmental 222Rn monitor based on ionization measurement*, *Health Phys*. 1988; 54(1): 47-56.
- US EPA. Indoor radon and radon decay product measurement device protocols available, 2013.
- Effective Dose, wikipedia. Available: <https://ko.wikipedia.org/wiki/%EC%9C%A0%ED%9A%A8%EC%84%A0%EB%9F%89> [accessed 14 October 2016].
- Lee GS, Kim JS, Kim JD. Absorbed and effective dose in direct and indirect digital panoramic radiography. *Imaging Science in Dentistry*. 2010; 40(1): 9-14.
- Korea Institute of Nuclear Safety. Nationwide surveillance on the environmental radiation; 2012.
- Korean Association for Radiation Protection. 2007 ICRP recommendation, ICRP document 103; 2008.