

국내 다양한 실내환경에서 라돈농도 및 거주자의 실효선량 평가

이철민[†] · 김윤신 · 노영만 · 김기연 · 전형진 · 김종철

한양대학교 환경 및 산업의학 연구소
(2007. 3. 5. 접수/2007. 5. 13. 채택)

Radon Concentration in Various Indoor Environment and Effective Dose by Inhabitants in Korea

Cheol Min Lee[†] · Yoon Shin Kim · Young Man Roh · Ki Youn Kim ·

Hyung Jin Jeon · Jong Cheol Kim

Institute of Environmental and Industrial Medicine, Hanyang University

(Received March 5, 2007/Accepted May 13, 2007)

ABSTRACT

The objective of this study was to offer basic and scientific data for decision-making of policy for improvement and management of radon, natural radiation gas, in Korea and to form the foundation of radon related international cooperation. Therefore, this study collected and re-analysed the articles on exposure of radon in various indoor environment in journals related environment in Korea since 1980 and estimated the annual exposure dose and effective dose by exposure of radon received by inhabitants in them. The highest pooled average radon concentration of $50.17 \pm 4.08 \text{ Bq/m}^3$ (95% CI : $42.17\text{--}58.17 \text{ Bq/m}^3$) was found in dwelling house among various indoor environment. All of pooled average radon concentration estimated in this study showed lower than the guideline concentration (148 Bq/m^3) of US EPA and the Korean Ministry of Environment. The annual effective dose received by inhabitants in various indoor environment was estimated 1.071 mSv/yr. That is equal to annual effective dose (1.0 mSv/yr) by exposure of radon estimated by UNSCEAR.

Keywords: radon, various indoor environment, pooled mean concentration, effective dose

I. 서 론

실내환경문제의 대표적인 실내공기질에 대한 문제의 발생 배경을 보면, 1970년대 이후 각종 산업분야에서 에너지 절감 및 효율을 높이기 위한 노력의 일환으로 열효율 향상을 위한 건물의 밀폐화와 에너지 절감 장치를 설치하는 건물의 증가로 인하여 이들 건물의 실내공기질이 악화되면서 발생되었다. 실내공기질의 악화는 인간 활동에 의해 발생되어지는 각종 오염물질들과 토양 등과 같은 자연적 발생원으로부터 발생되어지는 각종 오염물질들이 공기 중으로 방출되어 실내공기를 오염시키는 현상이라 할 수 있으며(Wood, 1991), 건축물 내 에너지 효율 증가의 목적으로 단열화와 밀폐화

가 가속됨에 따라 이들 발생원으로부터 발생된 유해공기오염물질들이 실내공기 중의 체류시간 증가로 인한 실내공기중 오염물질의 농도 증가 역시 실내공기질 악화의 주요 원인이라 할 수 있다.

현대인들 대부분이 일일 시간 중 90% 이상을 실내 환경에서 생활하고 있으며(Robinson & Nelson, 1995; 환경부, 2001), 또한 최근 연구에서 여러 실내환경에서 주요 유해공기오염물질의 농도가 실외보다 실내농도가 높다는 결과(Lee & Chang, 2000; 김 등, 2006) 등을 고려할 때 그 영향이 실내 거주자들의 생명을 위협할 정도는 아닐지라도 장기적으로 볼 때 건강에 나쁜 영향을 미치고 있음에 틀림없다. 따라서 환경보건학적 관점에서 실내공기질의 악화에 대한 대책 마련과 개선 및 관리방안의 수립은 현대사회에서 매우 중요시 고려되어야 할 시급한 과제라 할 수 있다.

이에 환경부에서는 실내공기질의 중요성을 인식하여 다중이용시설과 신축되는 공동주택의 실내공기질을 알

[†]Corresponding author : Institute of Environmental and Industrial Medicine, Hanyang University
Tel: 82-2-2220-1510, Fax: 82-2-2292-2510
E-mail : spica@hanyang.ac.kr

맞게 유지하고 관리함으로써 그 시설을 이용하는 국민의 건강을 보호하고 환경상의 위해를 예방함을 목적으로 2004년 5월 '다중이용시설등의 실내공기질관리법'을 제정·공포하여 시행 중에 있다. 이 법에서는 17개 다중이용시설군을 대상으로 유지기준 오염물질 5종(PM_{10} , CO_2 , 폼알데하이드, 총부유세균, CO)과 권고기준 오염물질 5종(NO_2 , Rn, TVOCs, 석면, 오존)을 선정하여 각 시설군별 실내공기질의 농도를 제안하고 있다. 이들 유지 및 권고기준오염물질들 대부분은 인간의 활동에서 발생하는 특성을 가지고 있으나 라돈의 경우 주 발생원이 토양인 자연방사선 물질로 실내공기질 개선 및 관리방안 수립에 있어 다른 유지 및 권고기준오염물질보다 주의를 기울여야 할 것으로 사료된다.

라돈은 우라늄 붕괴계열의 방사선 가스로 주거환경 및 작업장 내에서 인간의 방사선 노출에 있어 가장 높은 노출량을 나타내는 것으로 알려져 있으며(Fovt, 1999; UNSCEAR, 2000), 높은 라돈농도의 노출은 폐암을 야기한다는 연구결과가 보고되고 있다(Miles, 1988; Yang, 1999). 또한 1998년 NAS(National Academy of Sciences)의 보고에 따르면 미국은 매년 라돈의 노출로 인한 폐암 사망자가 15,000명에서 25,000명에 달하는 것으로 추정하고 있다고 제시하였다(NRC, 1999).

현재 ICRP(International Commission on Radiological Protection)에서는 라돈의 권고기준(action level)을 200~600 Bq/m³으로 정하고 있으며(ICRP, 1993), NRPB(National Radiological Protection Board, UK)에서는 주택 내 라돈의 권고기준을 200 Bq/m³ 이하로 유지하도록 권장하고 있다(NRPB, 1990). 또한 미국 EPA에서는 환경 중 라돈에 대한 인체 위해성은 라돈 4pCi/l(148 Bq/m³)가 인체에 흡입되었을 경우 폐암에 걸릴 수 있는 확률이 1,000명당 13~50명이며, 약 20 pCi/l(740 Bq/m³)에 노출될 경우 흡연자가 하루 담배 1갑을 태우는 것과 같은 정도의 위해성을 가진다고 보고하였다. 또한 주택 내 공기 중 라돈의 권고기준을 4 pCi/l(148 Bq/m³) 이하로 유지하도록 권장하고 있다(EPA, 1986). 이와 같이 선진외국에서는 많은 실태조사와 건강위해성평가 및 역학연구 등을 통해 라돈의 권고기준을 설정하고 이를 유지하기 위한 자국 및 국제적 연구를 활발히 진행 중에 있으나 우리나라의 경우 최근 환경부의 다중이용시설등의 실내공기질관리법에서 여러 실내환경중의 라돈농도를 EPA의 권고기준과 같은 수준으로 권고하고 있으나 현재까지 국내 실내환경중의 라돈농도 실태조사 및 건강위해성평가 연구 진행의 미진함을 고려할 때 국내 실내환경의 특성이 고려되지 않

는 것으로 판단된다. 따라서 국내 환경을 고려한 기준의 재설정 및 향후 라돈에 기인한 건강장해의 규명을 위한 역학연구의 진행에 있어 기초적 자료로 활용되어 질 수 있는 많은 실태조사가 절실히 요구되어진다.

이에 본 연구는 국내 다양한 실내환경을 대상으로 수행된 라돈농도에 관한 실태조사 결과들을 수집하고 수집된 자료의 재분석을 위해 메타분석법(meta-analysis method)을 이용하여 다양한 실내환경에서 공기 중의 라돈 농도에 관한 병합평균농도를 제시하고자 한다. 또한 각 실내환경별 거주자들이 실내공기 중 라돈의 흡입에 의한 노출선량과 실효선량을 산출하여 제시함으로써 향후 국내 실내공기질 관리정책에 있어 자연방사선 물질인 라돈에 관한 정책 및 관리방안 수립에 있어 본 연구의 결과가 기초자료로 활용되어지기를 바라며, 나아가 국제적 공동연구에 참여할 수 있는 기반을 형성하는데 기초자료로 활용되어지기를 바란다.

II. 연구방법

1. 다양한 실내환경 내 라돈농도 조사 자료 수집

과거 국내에서 수행된 다양한 실내환경 내 라돈농도 조사 자료의 수집은 한양대학교 백남학술정보관에서 지원하는 학술 데이터베이스(<http://library.hanyang.ac.kr/dlsearch/TGUI/Hanyang/Main.asp>) 중 국내 전자저널 검색 및 메타검색을 이용하여 다음과 같은 문헌검색 및 선정조건을 설정하고 이에 적합한 연구논문만을 선정하여 데이터베이스를 구축하였다.

본 연구의 수행을 위해 선정할 문헌 검색 조건으로는 첫째, 검색 엔진은 한양대학교 백남학술정보관 학술 데이터베이스 검색 중 국내 전자저널 검색 엔진과 메타검색 엔진을 이용한다. 둘째, 검색어로는 '실내환경', '다중이용시설', '실내공기질' 등 다양한 실내환경을 의미하는 단어와 '라돈'의 단어를 이용한다. 셋째, 환경관련학회지(한국대기환경학회지, 한국환경관리학회지, 한국환경보건학회지, 한국환경과학회지, 대한위생학회지, 한국생활환경학회지, 한국산업위생학회지, 대한환경공학학회지 등)에 제시된 논문을 검색한다. 또한 문헌 선정 조건으로는 첫째, 1980년대 이후에 국내 학회지에 발표된 연구논문만을 선정한다. 둘째, 선정된 연구논문의 내용을 확인하여 본 논문의 주제(실내공기중의 라돈 오염 및 인체영향)와 일치하는 연구논문만을 선별한다.

2. 자료 취합 및 분석

구축된 데이터베이스를 바탕으로 다양한 실내환경 내에서 조사된 라돈 농도에 대한 병합평균농도를 역분산

가중 평균산출법(inverse-variance-weighted average)을 이용하여 산출하였으며, 산출된 병합평균농도는 다양한 실내환경의 거주자들이 공기중의 라돈 호흡으로 인한 노출선량 및 실효선량 산출시 노출농도로 활용하였다.

다양한 실내환경내의 라돈의 병합평균농도 산출은 '첫째, 동일한 측정 및 분석방법을 사용하는 연구결과들로 분류한 후 고체비적검출기를 사용하여 라돈 농도를 조사한 연구결과만을 선정한다, 둘째, 각 실내환경별로 라돈의 농도와 범위(표준편차, 범위, 분산 및 최대값과 최소값)가 제시된 연구결과만을 선정한다.'라는 선정조건을 설정하고 조건에 적합한 연구결과만을 선정하여 활용하였다.

이 연구에 사용된 역분산 가중 평균법은 메타분석의 효과크기분석(analysis of effect-magnitude measures)의 일환으로 선정된 연구들의 결과(평균농도)들로부터 각 연구의 크기(자료수 등)를 고려하여 병합평균을 산출하는 방법이다(손, 1998). 이 방법은 병합평균의 추정량이 근사적으로 정규분포함을 가정한다. 즉,

$$\bar{\theta}_i = N(\theta_i, \omega_i^{-1}), \quad i = 1, 2, \dots, k$$

여기서 ω_i 는 $\bar{\theta}_i$ 의 역분산(inverse variance), 즉 $\omega_i = 1/\text{var}(\bar{\theta}_i)$ 이다. 또한 k 편의 연구는 독립이다. 따라서 병합평균 추정량을 $\theta_1 = \theta_2 = \dots = \theta_k = \theta$ 라 가정할 때 이의 분포는 다음과 같이 근사정규분포한다.

$$\sum \bar{\theta}_i \omega_i \sim N(\theta \sum \omega_i, \sum \omega_i)$$

따라서

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^k \bar{\theta}_i \omega_i}{\sum_{i=1}^k \omega_i}, \quad \text{즉} \quad \text{Var}(\bar{\theta}) = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \omega_i} \text{이다.}$$

$\bar{\theta}_i$ 가 근사정규분포함을 이용하여 $\bar{\theta}_i$ 의 95% 신뢰구간은 다음의 식을 이용하여 산출하였다.

$$\bar{\theta} \pm 1.96 \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^k \omega_i}}$$

여기서 ω_i 는 여러 연구결과들을 병합하는데 있어 가중(weight)의 역할을 한다.

3. 다양한 실내환경별 거주자들의 라돈의 연간 노출선량 및 실효선량 산출

다양한 실내환경별로 라돈에 의한 노출선량을 예측하

기 위해 역분산 가중 평균법을 이용하여 산출된 라돈의 병합평균농도를 근거로 라돈 자핵종의 농도 측정단위인 WL(Working Level: 공기 중 라돈농도가 100 pCi/l일 때 라돈 및 라돈 자핵종들이 방사평형에 도달했을 때 방출하는 α 방사선 전체 에너지)로 나타냄으로써 라돈에 의한 방사선 피폭선량을 산출하였다(Bodansky, 1989).

$$WL = Ft \times \frac{C_{Rn}}{100}$$

여기서 Ft : 실내 라돈 및 라돈 자핵종간의 평형인자 값
 C_{Rn} : 평균라돈농도

본 연구에서는 실내 라돈 및 라돈 자핵종간의 평형인자 값은 ICRP에서 제시하고 있는 0.4를 활용하였다(ICRP, 1994). 그리고 1 WL의 농도 분위기에서 한 달간 노출시간인 170시간 동안 누적된 피폭량을 1WLM(Working Level Month)로 환산하였다.

$$WLM = WL \times \frac{\text{Exposure time}}{170}$$

여기서 Exposure time: 여러 실내환경별 거주자의 거주시간

$$WLM/yr = WLM \times 12 \text{Months/yr}$$

또한 WLM 값을 연간 누적 노출선량인 WLM/yr로 환산하여 나타내었으며, UNSCEAR에서 제시하는 선량 전환계수(9 nSv/Bqhm⁻³)를 사용하여(UNSCEAR, 2000; 1993) 각 실내환경별 및 전체 실내환경에서 라돈에 기인한 연간실효선량을 산출하여 제시하였다. 이때 여러 실내환경별 거주자들의 실내 거주시간은 환경부에서 전국의 성인 838명을 대상으로 1일 활동 내역과 활동장소 및 그 장소에서의 소요시간을 조사하여 발표한 자료를 활용하였다(환경부, 2001).

III. 결 과

1. 국내 라돈농도 조사 연구 현황

1980년 이후, 국내 환경관련학회지에 수록된 연구결과물 중 라돈과 관련된 연구물은 총 37편이 발표되었으며, 이 중 본 연구의 문헌 선정 조건에 부합되는 연구결과물은 17편으로 조사되었다. 이 17편의 연구결과물의 내용을 정리하여 제시하면 Table 1과 같다.

Fig. 1은 다양한 실내환경별로 실내 라돈농도 조사가

Table 1. A summary of articles on radon survey in various indoor environments on Korean literature review

Unit: Bq/m³

Author (year)	Sampling indoor environment (period)	Sampling method	Summary (Concentration)
Jeon <i>et al.</i> (2006)	Subway station (1998~2004)	α -track detector	Subway station Platform(n=1325) 67.34±41.07, Concourse(n=1326) 52.17±31.08 Transform(n=279) 71.04±37.37
Lee <i>et al.</i> (2006)	House & Public facilities (1996. 2.~1997. 4.)	Radon Cup Monitor (Japan)	Department(n=8) underground 31.6±10.2, above ground 28.2±8.3 Office(n=8) underground 53.2±24.8, above ground 32.2±6.2 Apartment(n=8) underground 24.4±6.9, above ground 34.5±8.5 Hospital(n=8) underground 29.4±6.5, above ground 28.6±7.4 House(n=8) underground 88.6±50.3, above ground 50.5±61.2
Lee <i>et al.</i> (2004)	Subway station (1999. 1.~5.)	RadTrack detector (LANDAUER) Pylon AB-5(PYLON)	RadTrack Subway station Platform(n=33) 78.9±8.55 Concourse(n=34) 38.2±4.25 Office(n=34) 61.8±5.66 Pylon AB-5 Subway station(platform) (n=23) 26.76±11.00 (n=23) 19.55±14.68 (n=23) 80.68±20.72 (n=23) 64.57±12.52 (n=24) 28.00±13.28 (n=23) 21.75±11.60 (n=23) 116.55±23.93 (n=22) 71.56±22.36 (n=19) 29.76±9.75 (n=23) 75.30±16.69 (n=23) 30.61±13.53 (n=24) 61.05±10.99 (n=23) 20.67±7.73 (n=23) 102.42±13.47 (n=22) 93.63±22.01 (n=23) 74.08±13.07
Kim <i>et al.</i> (2004)	Public facilities (2004. 5.~8.)	RAD-7 (DURRIDGE)	Subway station(n=16) : 26.34±19.10, 22.83±8.67 Department(n=16) : 15.64±12.31 Library(n=16) : 22.20±8.88 Museum(n=16) : 20.43±11.88 Office(n=16) : 17.71±10.37 Theater(n=16) : 25.62±18.15 Apartment(n=16) : 10.24±6.84, 39.72±23.74 Kindergarten(n=16) : 7.68±3.03, 15.36±6.39
Kim <i>et al.</i> (2003)	House & Public facilities (2002. 12.~2003. 3.)	RadTrack detector (LANDAUER)	Office : 109, Hospital-1 : 51, Hospital-2 : 184, Subway station : 19, Bus station : 18, Theater : 27, Library : 13, Museum : 55, Kindergarten-1 : 60, Kindergarten-2 : 35, House : 34, Apartment : 88
Kim <i>et al.</i> (2003)	House & Public facilities (2000. 1.~12.)	RadTrack detector (LANDAUER)	House(n=2,500) : 53.4±57.5 Public Facilities(n=500) : 41.0±26.8
Kim <i>et al.</i> (2003)	House (2000. 10., 2001. 4., 2001. 9.)	Electret Passive Environment Radon Monitor	Chungbuk(n=15) :155.4±92.5 Daejun(n=24) : 159.1±66.6 Jeju(n=15) : 85.1± 37.0
Kim & Paik (2002)	House, Public facilities & School (1999. 8.~11.)	Electret Passive Environment Radon Monitor	Hospital(n=3) : underground - 40.6±19.8 above ground - 44.8± 18.5 Hotel(n=2) : underground - 54.1±36.9 above ground - 43.6±13.1 Department(n=2) : underground - 29.3±16.2 above ground - 13.3±16.2 House(n=6) : underground - 75.8±33.6 above ground - 39.8±26.4 School(n=1) : underground - 128.5±37.3 above ground - 40.8±4.6

Table 1. Continued

Author (year)	Sampling indoor environment (period)	Sampling method	Summary (Concentration)
Lee <i>et al.</i> (2002)	School(University) (19962.~12.) (19981.~12.)	EIRM (Model A : Aloka Gs-201)	1996 Seoul(n=4) : 30.6±6.9 Daegu(n=2) : 8.0 Daejon(n=4) : 37.4±6.9 Kwangju(n=2) : 20.8 Busan(n=2) : 12.8
			1998 Seoul(n=4) : 26.8±7.0 Daegu(n=2) : 28.2 Daejon(n=4) : 22.3±7.9 Kwangju(n=4) : 16.0±8.0 Busan(n=4) : 10.6±2.3
Kim <i>et al.</i> (2002)	School(University), Public facilities & House (1996. 2.~1997. 3.)	EIRM (Model A : Aloka Gs-201)	School(University) Seoul(n=6) : 29.0±12.3 Daegu(n=4) : 19.8± 12.9 Daejon(n=5) : 37.6±5.4 Kwangju(n=4) : 23.3±3.9 Busan(n=4) : 10.8±2.5 Department(n=5) : 28.2±9.6 Office(n=5) : 32.2±7.1 Hospital(n=5) : 28.6±8.5 House(n=5) : 50.5±70.7
Chung <i>et al.</i> (2001)	Underground store (1999. 1.~3.)	RadTrack detector (LANDAUER)	Underground store(n=16) : 16.65±4.81
Kim <i>et al.</i> (2000)	House & School (2000. 6.~9.)	RAD-7 (DURRIDGE)	School : 17.76±11.47 House : underground - 79.92± 48.10 above ground - 35.15±23.31
Kim <i>et al.</i> (1999)	School (1999. 4.~5.)	AlphaGUARD PQ 2000Pro (Genitorn Co)	School construction(n=2470) : 42.032±35.779 non-construction(n=2107) : 24.790±18.278 gneiss(n=2043) : 35.113±26.233 granite(n=1687) : 38.850±38.036
Kim <i>et al.</i> (1994)	Subway station (1991. 10.~11.)	CRM-510 (Femto-Tech)	Subway station exhaust on, make-up on(n=5) : 327.45±107.67 exhaust off, make-up on(n=5) : 205.35±38.11 exhaust on, make-up off(n=5) : 333.00±28.12 exhaust off, make-up off(n=5) : 233.10±37.74
Kim (1991)	House (1990. 11.~1991. 2.)	Track Etch Radon Monitor (Tarradex)	Yeongkwang(n=16) : 102.12±29.97 Uljin(n=20) : 58.09±29.97
Kim (1990)	House (1988. 12.~1989. 4)	Track Etch Radon Monitor(Tarradex)	Seoul Underground(n=8) : 125.8±27.38 Above ground(n=8) : 100.64±34.78 Bathroom(n=12) : 98.42±26.64 Kitchen(n=12) : 79.92±35.15 Living room(n=12) : 100.27±19.98 Energy-efficient(n=7) : 122.47±65.86 Non-energy-efficient(n=9) : 85.47±24.79
			Songtan Underground(n=6) : 156.51±93.24 Above ground(n=6) :103.97±66.23 Bathroom(n=13) : 106.56±29.23 Kitchen(n=13) : 62.9±22.57 Living room(n=13) : 99.53±51.06 Energy-efficient(n=8) : 143.93±61.79 Non-energy-efficient(n=10) : 79.55±38.11

Table 1. Continued

Author (year)	Sampling indoor environment (period)	Sampling method	Summary (Concentration)
			Dogo Underground(n=4) : 149.11±96.57 Above ground(n=4) : 103.23±58.09 Bathroom(n=13):109.15±53.65 Kitchen(n=13) : 74.37±27.75 Living room(n=13):97.31±46.62 Energy-efficient(n=7) : 143.93± 61.79 Non-energy-efficient(n=9):88.43±31.45
			Kunsan Underground(n=5) : 105.08±41.07 Above ground(n=5) : 98.05±37.74 Bathroom(n=14) : 102.86±39.22 Kitchen(n=14) : 107.30±42.55 Living room(n=14) : 122.47±65.86 Energy-efficient(n=6) : 109.89±34.78 Non-energy-efficient(n=11) : 57.35±22.94 Ventilation fan in kitchen Use(n=24) : 104.71±29.97 Not use(n=46) : 107.3±53.28
			House(n=34) : underground - 97.68±72.89, above ground - 63.27±17.76 House(n=20) : energy-efficient, underground - 123.58±87.32 above ground - 72.52±17.39 House(n=20) non-energy-efficient, underground - 105.08±44.03 above ground - 50.32±8.14
Kim (1989)	House & Public facilities	Track Etch Radon Monitor(Tarradex)	Subway station : 52.9 Underground store : 55.5 Underground passage : 77.7 Underground parking lot : 48.1 Tunnel : 52.9

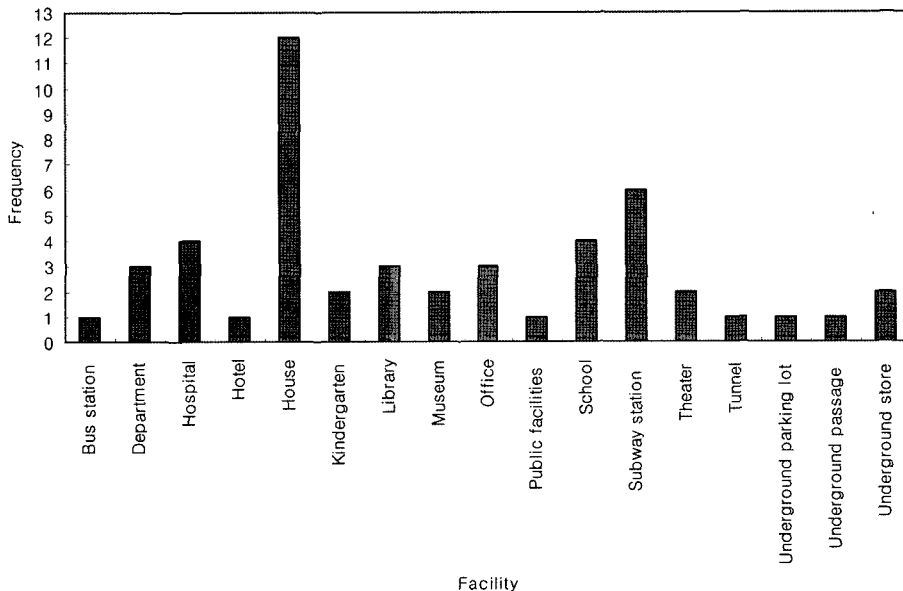


Fig. 1. Frequencies of each facility appeared in published radon related papers in Korea.

수행된 빈도를 제시한 것으로 주택(아파트 3건 포함)을 대상으로 조사가 수행된 건수가 12(24.5%)건으로 가장 높은 빈도를 나타냈으며, 다음으로 지하철 역사를 대상으로 한 연구가 6(12.2%)건, 학교와 병원을 대상으로

한 연구가 각 4(8.2%)건으로 높은 빈도를 나타냈다. 또한 나머지 다중이용시설을 대상으로 수행된 연구는 2003년 이후에 수행되어진 것으로 조사되었다. 실내공기중의 라돈농도는 토양이나 건축자재에 함유

되어 있는 라돈농도에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Durrani, 1999). 이러한 이유로 토양과 접해 있는 지하실이나 지하공간의 공기 중의 라돈농도가 다른 공간에 비해 높은 것으로 알려져 있다(Anastasiou *et al.*, 2003). 또한 실내 공기 중의 라돈농도에 큰 영향을 미치는 중요한 요소 중의 하나로 실내환기 상태를 들 수 있다(Li *et al.*, 2005). 뿐만 아니라 건물의 노후화, 건물의 높이 및 실내 온습도 등도 실내 공기 중의 라돈농도에 기여하는 중요한 인자라 할 수 있다(Barros-Dios *et al.*, 2007; Frederick & Paul, 2001). 이와 같이 실내공기중의 라돈농도는 주변 환경의 물리적, 화학적 특성에 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있으며, 선진외국의 경우 이들 영향인자를 규명하고 또한 이들 인자의 규제를 통한 라돈 농도의 저감방안을 수립하고자 하는 노력들이 이루어지고 있다. 국내 역시 이들 영향인자들의 영향을 규명하기 위해 실태조사 내 연구범위에 포함하여 연구를 수행하여 오고 있는 것으로 조사되었다. 이러한 영향인자의 영향 규명을 위한 대표적 연구범위로는 동일 건축물내 지상 및 지하에서의 라돈농도의 차이 규명, 조사지역 지질의 차이에 따른 실내 라돈농도의 차이 규명, 실내 온습도와 라돈농도와의 관련성 규명, 미세먼지 등과 같은 실내 공기오염물질 농도와 라돈농도와의 관련성 규명, 환기량(에너지 효율 및 비효율 건축물)에 따른 라돈농도의 차이 규명 및 건물의 연식에 따른 라돈농도의 조사 등을 들 수가 있다. 이 밖에 실내 지하수층의 라돈농도가 실내 공기 중 라돈농도에 기여하는 정도를 파악하기 위한 조사 등이 수행되어진 것으로 조사되었다.

2. 실내환경별 병합평균 라돈농도

다양한 실내환경별 공기 중 라돈의 병합평균농도를 산출하기 위해 국내 실내공기 중 라돈농도를 조사한 연구결과 중 고체비적검출기(CR-39 film)를 이용하여 조사한 연구결과만을 선정하여 다양한 실내환경별 공기 중 병합평균 라돈농도를 산출하여 제시하였다(Fig. 2).

다양한 실내환경중의 병합평균 라돈농도 중 가장 높은 농도를 나타낸 시설은 주택으로 $50.17 \pm 4.08 \text{ Bq/m}^3$ (95% 신뢰구간: $42.17 \sim 58.17 \text{ Bq/m}^3$)로 조사되었다. 이는 현 국내 다중이용시설등의 실내공기질관리법 및 US EPA에서 권장하고 있는 권고농도인 148 Bq/m^3 에 비해, 약 1/2 이하의 수준으로 국내 여러 실내환경의 공기 중 라돈농도가 매우 낮게 분포하고 있음을 보여주는 결과라 할 수 있다.

Fig. 3은 건축물의 지상과 지하 공기 중의 병합평균 라돈농도 및 에너지효율을 증대시키기 위해 밀폐화와 에너지 절감장치가 설치된 건물과 설치되지 않은 건물 내의 병합평균 라돈농도를 나타낸 것이다. 건축물의 지하공간에서의 병합평균 라돈농도는 $32.00 \pm 4.08 \text{ Bq/m}^3$ (95% 신뢰구간: $24.00 \sim 40.00 \text{ Bq/m}^3$)로 산출 되었으며, 지상공간에서의 병합평균 라돈농도는 $33.38 \pm 3.54 \text{ Bq/m}^3$ (95% 신뢰구간: $26.45 \sim 40.30 \text{ Bq/m}^3$)로 산출되어 지하 및 지상간에 유사한 농도를 보이고 있는 것으로 조사되었다. 에너지효율 증대를 위한 에너지 절감장치 시설이 설치된 건축물과 비설치 건축물 내 공기 중의 병합평균 라돈농도는 각각 $90.00 \pm 14.14 \text{ Bq/m}^3$, $60.50 \pm 7.07 \text{ Bq/m}^3$ 로 밀폐화 및 에너지절감장치가 설치된 건축물 내의 라돈농도가 약 1.5배 높은 것으로 조사되었다.

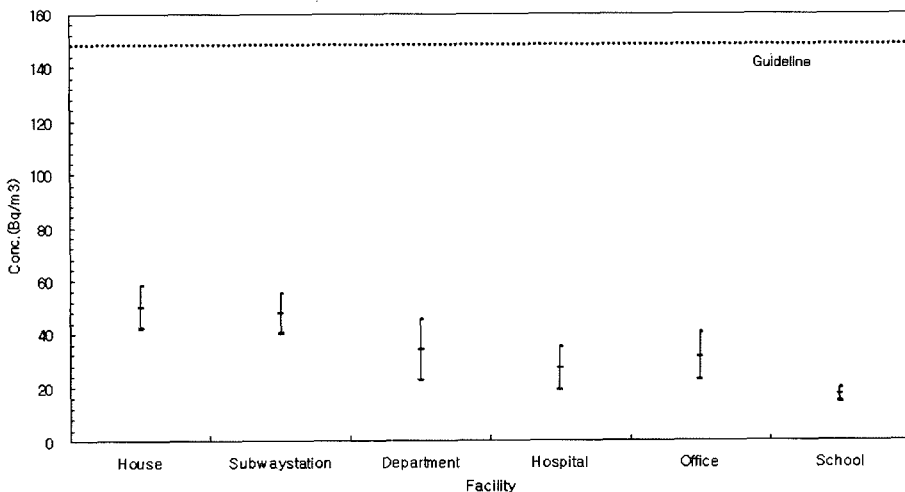


Fig. 2. Distribution for pooled mean concentration of radon in various indoor environment.

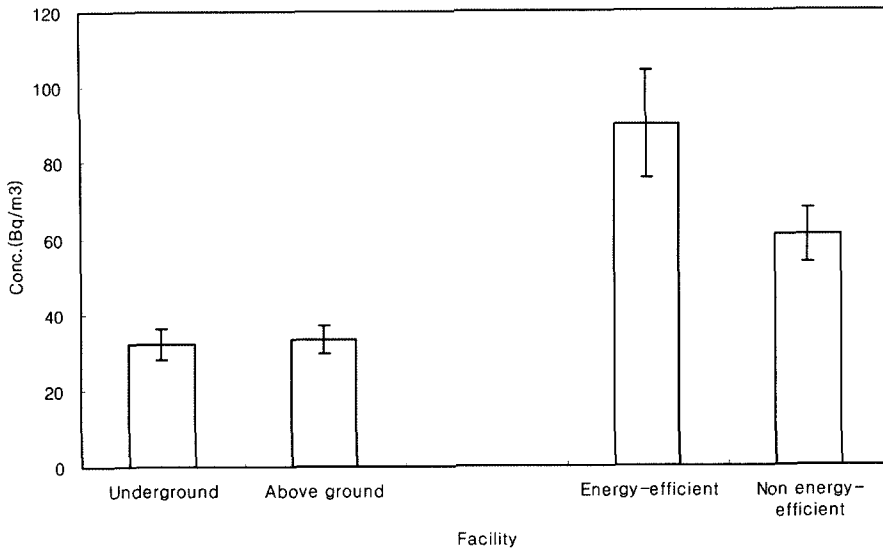


Figure 3. Comparison of pooled concentration of radon by location and type of facility

Table 2. Annual exposure dose and effective dose by exposure to radon received by inhabitants in various indoor environment

Facility	Expoure time (min/day)	Exposure dose			Effective dose ¹
		(WL)	(WLM)	(WLM/yr)	(mSv/yr)
Department	5.62	0.136	0.002	0.027	0.004
Hospital	13.48	0.107	0.004	0.051	0.008
House	791.82	0.201	0.467	5.608	0.870
Office	223.89	0.125	0.082	0.986	0.153
School	76.03	0.068	0.015	0.181	0.028
Subway station	7.09	0.191	0.004	0.048	0.007
Total	1117.93	0.827	0.575	6.901	1.071

¹Sv : Gy multiplied by a weighting factor specific to each type of radiation and organ.

3. 연간 노출선량 및 실효선량

다양한 실내환경에서 거주자들이 실내 공기 중의 라돈 노출로 인한 노출선량 및 연간 실효선량을 산출한 결과 가장 높은 연간 노출선량 및 연간 실효선량을 나타낸 실내환경은 주택으로 각각 5.608 WLM/yr, 0.870 mSv/yr로 산출되었다(Table 2). 이는 주택이 다른 실내 환경에 비해 라돈의 농도가 높았으며, 거주자들의 실내 체류시간이 다른 실내환경에 비해 오랜 시간을 체류하고 있어 기인된 결과로 다른 실내환경에 비해 주택에 대한 중점적 조사가 요구되어짐을 시사하는 결과로 여겨진다.

다양한 실내환경에서 생활하고 있는 거주자들의 연간 노출선량 및 실효선량을 산출하기 위해 각 시설별로 산출된 연간 노출선량 및 실효선량을 합한 결과 각각 6.901 WLM/yr, 1.071 mSv/yr로 조사되었으며

(Table 2), 이 연간 실효선량은 UNSCEAR에서 제시하는 연간 실효선량인 1.0 mSv/yr와 유사한 값을 나타냈다(UNSCEAR, 2000).

IV. 고 찰

1970년대 들어 세계 각국들은 라돈이 일반인의 총 피폭선량의 큰 비중을 차지하며, 높은 라돈농도에 지속적으로 노출되는 경우 폐암 발생 가능성이 높아진다는 점과 라돈은 인공방사선과는 달리 자연 발생적인 방사선원이므로 통제와 관리상의 어려움이 수반된다는 점에서 많은 연구자들의 관심이 집중되어 왔다. 이에 따라 선진 외국들은 라돈에 의해 자국 국민들이 받는 연간 피폭선량을 평가하고, 필요시 라돈농도에 대한 권고치를 설정하여 라돈으로부터 국민의 건강을 보호하기 위

하여 1980년~1990년대에 국가별로 전국 규모의 라돈농도 조사를 수행하였다(UNSCEAR, 1993). 또한 최근 세계보건기구(WHO)에서는 거주자들이 라돈노출로 인한 건강영향 평가를 수행하고 나아가 회원국들에게 라돈의 적정 관리방안 및 정책을 제시하기 위한 국제 공동연구를 추진 중에 있다(Zhanat C, 2005). 이에 반해 국내의 경우 일부 대학 및 연구소에서 국부지역에 국한된 라돈농도 조사를 실시한 바 있으나 전국 규모의 종합적인 조사는 아직 이루어지지 못한 실정이며, 라돈흡입에 의한 건강위해성평가 및 관리방안 수립에 관한 연구는 전무한 실정이다.

이에 본 연구는 세계보건기구에서 수행하고 있는 국제적 공동연구에 참여하기 위한 발판을 마련하기 위한 일환으로 크게 두 가지로 구분하여 연구를 수행하였다. 첫째, 국내 다양한 실내환경을 대상으로 공기 중의 라돈농도에 관한 실태조사 연구 결과를 수집하고 재분석하여 그 결과를 제시하였으며, 둘째, 다양한 실내환경의 공기 중 라돈 흡입으로 인한 노출선량 및 실효선량을 산출하여 제시하였다. 그러나 국내 실내환경 중의 라돈농도 조사에 관한 연구는 일부 소수의 연구진에 의해 단기간에 일부 지역에 국한되어 수행되어져 왔기 때문에 본 연구결과가 국내 실내환경 중의 라돈농도를 대표하기에는 무리가 있으며, 또한 이와 같은 농도 결과를 바탕으로 흡입에 의한 노출선량 및 실효선량을 산출하기에는 많은 제약점의 발생을 배제할 수 없다. 이에 본 연구에서는 이와 같이 발생되어 질 수 있는 많은 연구의 제약점들 중 감소시킬 수 있는 제약점들을 고려하고 이들 제약에서 올 수 있는 연구결과들의 오류를 줄이기 위해 과거 단편적으로 수행된 연구 결과들을 취합하여 제시함으로써 빈약한 조사 자료에서 올 수 있는 편견을 제외하고자 노력하였으며, 이러한 취합과정에서 발생될 수 있는 연구의 질을 고려하기 위해 국내 환경관련 학술지에 발표된 논문만을 선정하여 활용하였고 보고서 등의 자료는 이 연구의 범위에서 제외하였다. 또한 과거 단편적으로 선행된 연구조사 자료의 선별 및 취합과정에서 발생될 수 있는 불확실성을 최소화하기 위해 연구자료의 선별에 있어 문헌 선정 기준 즉, 실태조사를 목적으로 수행되어진 연구 논문의 결과만을 선정하고 이들 선정된 논문들 중 동일측정 및 분석방법에 의해 조사한 논문들만을 선정하기 위한 문헌 선정 기준을 설정하고 이 기준에 준하는 연구결과들만을 선정하였 등 여러 연구결과들을 통합하는 과정에서 발생될 수 있는 연구별 이질성을 최대한 줄이기 위해 노력하였다. 본 연구에서는 측정방법의 이질화에서 올 수 있는 편견을 최소화하기 위해 고체비적검출

기를 사용한 연구결과들만을 선정하여 활용하였는데 이는 고체비적검출기의 경우 국제적으로 자국의 실내 라돈농도 분포를 파악하기 위한 연구에 광범위하게 이용되어지고 있으며(Durrani & Ili, 2004), 장기간의 노출을 통한 라돈농도를 평가하는 측정방법으로 단기간의 여러 영향인자로 인한 라돈농도의 변화에 민감하게 반응하지 않음으로써 조사대상 시설 내의 평균적 라돈농도를 나타내는데 적합한 방법으로 여겨져 본 연구 목적에 적합한 측정방법이라 사료되어 고체비적검출기를 이용하여 조사한 연구결과만을 선정하고 취합하여 병합평균라돈농도를 산출하였다. 뿐만아니라 선정된 문헌에 제시된 연구결과들의 병합과정에서 발생될 수 있는 불확실성을 줄이기 위한 방안으로 개별연구의 연구크기(자료수)를 고려한 역분산 가중 평균 산출법을 활용함으로써 산출된 병합평균농도의 정밀도를 높이고자 하였다. 이러한 연구설계 과정에서 발생되어 질 수 있는 제약점을 감소시키기 위한 노력에도 불구하고 발생되어질 수 있는 연구 제약점을 살펴보면 첫째, 연구의 선정에 있어 국내 실내환경에 관한 선행된 연구결과들을 전체 반영하지 못함으로써 발생되어 질 수 있는 표본추출의 오류로 인한 표본의 대표성 및 결과에 대한 해석상의 오류를 완전히 제어하지 못하였다. 둘째, 국내 전 지역의 다양한 실내환경의 실내공기 중 라돈농도 조사 자료를 연구대상으로 선정함으로써 수집된 자료들 간의 연구지역적 차이 즉, 토양의 종류에 따른 차이에서 발생되어 질 수 있는 가변성 및 연구 수행자들 간의 차이에서 발생될 수 있는 가변성을 고려하지 못한 자료의 병합에서 발생될 수 있는 자료집계의 오류를 완전히 제어하지 못하였다. 그러나 본 연구는 단편적으로 수행되어온 국내 다양한 실내공기중 라돈농도 조사자료를 검토하고 또한 이들 연구 자료들을 활용하여 다양한 실내환경별 거주자들의 라돈 흡입으로 인한 연간 노출선량 및 실효선량을 제시함으로써 세계보건기구 및 세계 방사선 관련 기관에서 수행하고 있는 국제적 공동연구에 참여할 수 있는 기초적 자료의 확보 및 발판을 마련하였다는 의미에서 본 연구는 큰 의미를 가질 수 있다고 본다.

국내 실내공기중 라돈농도 조사에 관한 연구는 대부분 주택과 지하철 역사를 대상으로 수행되어진 것으로 조사되었다. 이는 과거 국내 실내공기질 관련 연구가 주택을 중심으로 이루어졌다는 이 등(2004)의 보고(이 등, 2004)와 일치하는 결과이며, 지하철 역사내 라돈농도 조사 연구가 많이 이루어진 것은 라돈의 주 발생원이 토양으로 지하실 등의 지하공간의 라돈농도가 높다는 이전의 연구결과를 바탕으로 라돈에 의한 문제가 아

기될 가능성이 높은 국내 대표적 지하시설물인 지하철 역사를 대상으로 많은 연구가 수행되어진 것으로 여겨진다. 또한 2003년 이후 주택 및 지하철 역사 이외의 다중이용시설로의 연구범위가 확대되어지고 있는 것으로 조사되었는데 이는 2004년 환경부의 다중이용시설 등의 실내공기질관리법의 시행으로 인해 라돈을 포함한 여러 실내공기오염물질에 관한 조사 연구범위가 다중이용시설을 포함한 다양한 실내환경으로 확대되어짐으로서 기인된 결과로 여겨진다.

국내 다양한 실내환경별 공기중 병합평균 라돈농도를 산출한 결과 조사 대상 모든 시설에서 산출된 농도분포 모두 다중이용시설등의 실내공기질관리법 및 USEPA에서 제시하고 있는 실내공기중 라돈의 권고기준인 148 Bq/m^3 에 크게 못 미치는 것으로 조사되었다. 본 조사 대상 시설 중 가장 높은 농도를 나타낸 시설은 주택으로 이 시설은 다른 시설에 비해 거주자들의 가장 오랜시간을 체류하고 있음을 고려할 때 지속적인 조사를 통한 라돈의 유지관리가 꾸준히 이루어져야 할 것으로 사료된다. 또한 지하철 역사의 경우 지하환경의 대표적 시설이며 간헐적으로 지하수의 유입 등에 기인한 실내공기중의 라돈농도 증가 등의 사례가 있었던 시설로 주택과 같이 지속적인 조사를 통한 유지관리가 꾸준히 이루어져야 할 것이다.

건축물의 지상과 지하 공기 중의 병합평균 라돈농도 비교결과는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났으나 이는 동일한 건축물의 지상과 지하의 공기중 라돈농도 간의 비교가 이루어지지 않아 기인된 결과로 여겨져 본 연구의 병합평균 산출에 이용된 개별 연구 결과들을 고찰한 결과 지하공간의 실내공기중의 라돈농도가 지상공간의 실내공기중의 라돈농도보다 높음을 확인할 수 있었다. 또한 에너지 효율 증대를 위한 밀폐화와 에너지 절감 장치가 설치된 건물의 라돈농도가 에너지 절감 장치가 설치되지 않은 건물의 라돈농도보다 높게 조사되었는데 이와 같은 결과는 건물내 환기가 실내공기중의 라돈농도 저감에 기여하고 있음을 간접적으로 시사하는 결과로 향후 건물내 라돈농도 저감을 위한 방안으로 지하시설로부터 지상의 거주공간으로의 공기 이동경로의 차단 및 적극적인 환기 활동 등이 고려되어야 할 것으로 여겨진다. 또 이와 같은 연구결과는 국내 실내공기중 라돈농도의 영향인자에 관한 연구가 실태조사 가운데 부분적 연구의 일환으로 수행되어지고 있어 관리방안 도출에 있어 라돈농도에 큰 영향을 미치는 영향인자를 규명하기 위한 연구는 전무한 실정임을 확인할 수 있어 향후 실내공기중 라돈농도 저감을 위한 관리방안 수립에 있어 활용될 수 있도록 실내 라

돈농도분포의 영향인자 규명을 위한 연구의 계획 수립 및 수행이 절실히 요구되어진다.

다양한 실내환경의 공기 중 라돈의 흡입으로 인한 연간 실효선량 평가 결과 UNSCEAR에서 제시하는 연간 실효선량 1.0 mSv/yr (UNSCEAR, 2000)와 유사한 값을 나타냈으나 이는 본 연구의 대상시설인 주택, 지하철 역사, 백화점, 병원, 사무실 및 학교에서 체류하면서 노출되는 실효선량으로 다른 시설물에서의 라돈 노출로 인한 실효선량은 포함되지 않은 값이다. 따라서 다른 실내환경에서의 노출을 고려할 때 다소 UNSCEAR에서 제시하는 연간 실효선량을 초과하는 실효선량값을 나타낼 수 있을 가능성이 있는 것으로 사료되나 다른 실내환경에서의 체류시간이 길지 않아 크게 초과하지는 않을 것으로 기대된다. 이의 명확한 규명을 위해 최근 국내 실내환경의 연구가 다중이용시설을 포함한 여러 실내환경으로 확대되어지고 있어 추후 이들 시설에 대한 라돈농도 조사 자료를 확보하고 또한 거주자들의 노출형태에 관한 자료 역시 재 확보함으로써 국민들이 공기 중 라돈 흡입으로 인한 전체 실효선량을 평가하여 제시하고자 한다.

본 연구의 수행을 통해 아직 국내 라돈관련 연구가 선진외국의 연구에 비해 매우 미흡함을 알 수 있었으며, 또한 라돈 흡입으로 인한 폐암발생 및 기타 다른 건강장해 규명을 위한 역학연구는 전무한 실정임을 다시금 확인할 수 있었다. 라돈의 경우 자연적으로 발생되는 자연방사선 물질로 우리 주변환경에 항상 존재하는 오염물질이며, 폐암등과 같은 건강장해를 유발하는 유해오염물질임을 고려하여 국내 관련 연구 및 정책적 부흥이 이루어져야 할 것으로 여겨진다. 이러한 국내 관련 연구 및 정책의 부흥을 도모하기 위한 적극적인 활동으로 관련 연구의 국가차원의 적극적인 지원이 요구되며, 나아가 세계 관련기관의 국제공동연구에 국내 많은 연구자 및 정부의 적극적 참여가 요구된다.

V. 결 론

선진외국의 경우 1970년대 이후부터 지속적이며 광범위한 자국내 실내환경에서의 라돈농도분포에 관한 실태조사를 꾸준히 수행하여 오고 있으며, 이러한 장기간의 실태조사를 통해 구축된 자료를 바탕으로 라돈의 흡입으로 인한 건강영향평가 연구 및 역학연구 등을 통해 라돈의 권고기준 설정과 관리방안 수립 등의 연구를 수행하여 오고 있는 현황이다. 또한 자국내 연구에 그치지 않고 지구환경(Global environment)의 개념에서 관련 국제기구와 함께 국제적 공동연구를 추진 중에 있

다. 이와 같은 국제적 추세에 반하여 국내의 경우 실내 환경에서의 라돈에 관한 연구는 현황 및 동향조차 파악되지 않은 실정에 있다.

이에 국내 라돈연구의 현황 및 동향을 파악하고자 국내 실내환경에서의 라돈농도에 관한 실태조사 결과들을 수집하여 연구현황 및 동향을 파악하고 또한 수집된 자료를 메타분석법을 활용하여 다양한 실내환경에서의 공기중 라돈농도에 관한 병합평균농도를 제시하고자 본 연구를 수행하였으며, 나아가 이 자료를 바탕으로 국민들이 다양한 실내환경에서 거주하면서 라돈의 흡입으로 인한 노출선량 및 실효선량을 평가하여 제시함으로써 궁극적으로 라돈 관련 국제적 공동연구에 참여할 수 있는 기반을 마련하고자 본 연구를 수행하였다.

국내 실내환경에서의 라돈농도 조사 연구의 현황은 1980년대 후반부터 연구가 수행되어졌으나 일부 연구자들에 의해 일부 지역 및 주택 및 지하환경과 같은 일부 실내환경에 국한되어 간헐적으로 수행되어져온 것으로 조사되었으나, 최근 환경부의 다중이용시설등의 실내공기질관리법의 시행된 이후 여러 실내환경으로 그 연구 범위가 확대되어지고 있는 것으로 조사되었다.

국내 다양한 실내환경별 공기중 평균라돈농도는 주택이 50.17 Bq/m^3 으로 가장 높은 농도를 나타냈으며 다음으로 지하철 역사, 백화점 등의 순으로 조사되었다. 가장 높은 농도를 나타낸 주택의 라돈농도의 경우 현 환경부 및 US EPA에서 권고하고 있는 실내 라돈권고기준인 148 Bq/m^3 의 약 1/2 이하의 수준으로 이와 같은 결과는 국내 다양한 실내환경에서의 공기 중 라돈농도가 현 권고기준에 비해 매우 낮게 분포하고 있음을 시사하는 결과이다.

산출된 다양한 실내환경에서의 공기중 라돈농도 결과를 바탕으로 국민들이 다양한 실내환경에서 생활하면서 라돈의 흡입으로 받을 수 있는 실효선량을 산출한 결과 1.071 mSv/yr 로 UNSCEAR에서 제시하고 있는 라돈의 흡입으로 인한 연간 실효선량인 1.0 mSv/yr 와 유사한 것으로 조사되었다.

본 연구의 수행을 통해 국내 라돈관련 연구현황의 경우 선진외국의 연구현황 및 동향에 비해 매우 미흡한 실정으로 건강영향 규명을 위한 건강위해성평가 및 역학연구는 전무한 실정이며 일부 지역 및 연구자들에 국한된 간헐적이며 단기간의 실태조사만이 수행되어지고 있음을 알 수 있었다. 또한 이들 실태조사 역시 매우 미흡한 실정임을 확인할 수 있었다. 그러나 본 연구를 통해 미흡하나마 과거 국내 라돈 관련 연구현황 및 실태조사 결과의 재분석을 통한 국민의 실효선량을 제시

함으로써 향후 관련 연구에 본 연구자료가 기초자료로 활용되어지기를 바라며 나아가 국제적 공동연구에 국내 정부기관 및 연구자들이 참여할 수 있는 기반으로 서 활용되어지기를 기대한다.

참고문헌

1. 김동술, 김윤신, 김신도, 신용배, 김성천, 유정석 : 서울시 지하철역내의 라돈 농도분포 및 저감대책. 한국대기보전학회지, **9**(4), 271-277, 1994.
2. 김순애, 백남일 : 도시 일부지역에서의 실내 라돈농도에 관한 연구. 한국환경위생학회지, **28**(2), 89-98, 2002.
3. 김영준, 김진용, 박성은, 신동천 : 서울시내 초등학교에서의 실내라돈 농도에 관한 조사 연구. 한국대기환경학회 1999 추계학술대회 논문집, 297-298, 1999.
4. 김윤신 : 서울시 일부 지역에서의 실내 라돈 농도에 관한 조사. 한국환경위생학회지, **15**(1), 11-18, 1989.
5. 김윤신 : 우리나라 일부 주택내 라돈 농도에 관한 조사연구. 한국환경위생학회지, **16**(1), 1-7, 1990.
6. 김윤신 : 원전주변주택의 실내의 라돈 농도에 관한 조사연구. 대기보전학회지, **17**(2), 60-66, 1991.
7. 김윤신, 김현탁, 이철민, 장기석, 안지호 : 서울시 일부 실내환경 중 미세먼지와 라돈농도 분포에 관한 연구. 한국대기환경학회 2000 추계학술대회 논문집, 365-366, 2000.
8. 김윤신, 노영만, 홍승철, 이철민, 조정형, 전형진, 김종철 : 다중이용시설에서의 라돈농도 특성에 관한 연구. 한국대기환경학회 2004 추계학술대회 논문집, 505-506, 2004.
9. 김윤신, 이철민, 김현탁, Takao Iida : Alpha Track Detector를 이용한 실내의 라돈 농도 조사에 관한 연구. 한국환경위생학회지, **28**(5), 71-76, 2002.
10. 김윤신, 홍승철, 이철민, 박원석, 이태형, 전형진, 조정형 : 다중이용시설의 실내공기중 라돈농도분포 특성. 한국대기환경학회지 2003 추계학술대회 논문집, 529-530, 2003.
11. 김예신, 김진용, 박화성, 문지영, 박성은, 신동천 : 한국대기환경학회 2003 춘계학술대회 논문집, 369-370, 2003.
12. 김창규, 김용재, 이재성, 노병환 : 국내 가옥 및 공공 건물내 라돈농도. 한국대기환경학회지 2003 춘계학술대회 논문집, 67-68, 2003.
13. 김희갑, 정경미 : 춘천의 가정에서 미세분진(PM2.5)과 입자상 다환방향족탄화수소에 대한 계절적 노출변동. 한국환경독성학회, **21**, 57-69, 2006.
14. 손혜향 : 의학, 간호학, 사회과학 연구의 메타분석법, 청문각, 1998.
15. 이종대, 김윤신, 손부순, 김대선 : 국내 실내 라돈농도와 연간피폭선량 예측에 관한 연구. 한국환경과학회지 **15**(4), 311-317, 2006.
16. 이철민, 김윤신, 김종철, 전형진 : 서울시 지하철역사의 라돈농도분포 조사. 한국환경보건학회지 **30**(5), 2004.
17. 이철민, 김윤신, 박원석, Takao Iida : 주요 5개 도시의 실내의 라돈농도 조사연구. 대한위생학회지 **17**(3), 75-82, 2002.
18. 전재식, 김덕찬, 이호찬, 이지영, 홍대화, 이연수, 신정

- 식 : 서울지역 지하역사의 라돈농도 분포 특성 평가. 한국대기환경학회 2006 춘계학술대회 논문집, 549-551, 2006.
19. 정현주, 백승화, 김종현 : 대전지역 지하상가에서의 라돈농도와 연간 피폭선량 예측. 환경관리학회지, 7(2), 219-225, 2001.
 20. 환경부 : 노출평가지침서, 2001.
 21. Anastasiou, T., Tsertosa, H., Christofides, S. and Christodulides, G : Indoor Radon(^{222}Rn) concentration measurements in Cyprus using high-sensitivity portable detectors. *Journal of Environmental Radioactivity* 68, 159-169, 2003.
 22. Bodansky, D. : Overview of indoor radon problem in : indoor Radon and its Hazards. University of Washington Press. Seattle and London, 9-23, 1089.
 23. Durrani, S. A. : Radon concentration values in the field: correlation with underlying geology. *Radiat. Meas.* 31, 271-276, 1999.
 24. Frederick, M. and Paul S. Phillips : Investigation of the potential for radon mitigation by operation of mechanical systems affecting indoor air. *Journal of Environmental Radioactivity* 54, 205-219, 2001.
 25. Fovt, L., Baixeras, C., Domingo, C. and Fernandez, F. : Experimental and theoretical study of radon levels and entry mechanism in a Mediterranean climate house. *Radiation Measurement*, 31, 277-282, 1999.
 26. International Commission on Radiological Protection (ICRP) : Protection against radon-222 at home and at work ICRP Publ. 65, Ann. ICRP 23(2), 1-38.
 27. Barros-Dios, J. M., Ruano Ravina, A. and Gastelu-Iturri, J. : A figueiras, Factors underlying residential radon concentration, results from Galicia, Spain. *Environmental Research* 103, 185-190, 2007.
 28. Lee, S. C. and Chang, M. : Indoor and Outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong. *Chemosphere*, 41, 109-113, 2000.
 29. Li, X., Wang, Y., Zheng, B. and Wang, X. : A study of reducing radon level by ventilation in underground space. *Nuclear Techniques* 28, 954-956, 2005.
 30. Miles, J. : Development of maps of radon-prone areas using radon measurements in houses. *Journal of Hazardous Materials*, 61, 53-58, 1988.
 31. National Radiological Protection Board(NRPB) : Statement by the National Radiological Protection, limitation of human exposure to radon in homes. Doc., NRPB 1(1), 15-16, 1990.
 32. Robinson, J. and Nelson, W. C. : National Human Activity Pattern Survey data base, United States Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, 1995.
 33. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation(UNSCEAR) : 2000 Report to the General Assembly, New York, United Nations, 2000.
 34. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation(UNSCEAR) : 1993 Report to the General Assembly, New York, United Nations, 1993.
 35. US EPA : A Citizen's Guide to Radon. Office of Air and Radiation, OPA-86-004, 1986.
 36. US National Research Council : Board on Effects of Ionizing Radiation VI Report on Health Effects of Exposure to Radon 1999, <http://www.nap.edu/books/0209056454/html/index.html>.
 37. Wood, J. E. : An engineering approach to controlling indoor air quality, *Environmental Health Perspective*, 15-21, 1991.
 38. Yang, W., Lei, Y., Lu, Y., Liu, H., Shuang, W., Lu, Y. and Li, W. : Measuring ^{222}Rn level in underground space by SSNTD's. *Chinese Journal Health*, 3, 93, 1999.