

라돈의 가이드라인 고찰 및 선량 예측

정은교* · 김갑배 · 장재길 · 송세욱

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

Review of Guidelines for Radon and Estimation of Radiation dose

Eun Kyo Chung* · Kab Bae Kim · Jae Kil Jang · Se Wook Song

Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA

ABSTRACT

Objectives: To review reference levels by the international and domestic management and provide the basis for setting occupational exposure limits(OELs) of radon in Korea

Methods: Government's organizations with laws and systems for monitoring radon exposure were investigated and compared. There are five laws governing Indoor Air Quality(IAQ) control such as Occupational Safety and Health Act, Indoor Air Quality Control in Public Use Facilities, Etc. Act, School Health Act, Public Health Control Act and Parking Lot Act in Korea. It was surveyed that a total of 32 countries including 24 countries in the European Union(EU), six countries in Asian and two countries in North America setting the reference levels for radon in the world.

Results: In Korea, there are set guidelines for radon in the Ministry of Environment and the Ministry of Education. Reference levels of radon for existing dwellings were 150~400 Bq/m³ for Western European countries, and 200~1,500 Bq/m³ in Eastern European countries. Approximately 67% of those EU countries were set up 400 Bq/m³ to the standards for existing dwellings. EU countries such as Luxembourg, Finland, Norway, Sweden and Russia had adopted mandatory level for radon. Radon guidelines for new dwellings were set more strictly reference level(200 Bq/m³) than existing dwellings.

Conclusions: International organizations such as ICRP, UNSCEAR and NCRP, etc. had recommended the guidelines for radon. It was calculated the relation of the dose conversion factors with the annual effective doses. the OELs of radon suggest to need to establish 150 Bq/m³ for office room and 400~1,000 Bq/m³ for the workplace.

Key words: effective dose, IAQ, NORM, radon, reference level

I. 서 론

최근 마스크에서 폐암환자의 아파트에서 검출된 라돈이 폐암의 원인으로 제기되었고 발생원으로 라돈을 방출하는 건축자재로 추정하였으며 또한 지하철 역무원의 폐암 사망한 것과 관련하여 역학조사 결과 라돈이 주요 발생원인인 것으로 밝혀졌다.

라돈(²²²Rn)은 생활공간 어디에나 존재하는 천연방사성물질(Naturally Occurring Radioactive Material,

NORM)로서 반감기가 3.8일이며 8번의 붕괴를 거치면서 알파, 베타, 감마선을 방출한다. 이러한 라돈 붕괴산물들은 먼지 등에 잘 흡착되며, 폐에 흡입된 후 붕괴하면서 방사선을 방출하여 폐암을 일으키는 인체발암물질로 규정되어 있다(WHO, 2009; IARC, 2015). 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)에서는 NORM 관련 산업에 대해 총 12가지로 분류하고 있는데, 즉 ¹)우라늄 채광 및 정련, ²)희토류 추출, ³)토륨 추출 및 이용, ⁴)니오븀(Nb

*Corresponding author: Eun Kyo Chung, Tel: 052-703-0902, E-mail: jungkek60@kosha.or.kr
Occupational Safety and Health Research Institut. KOSHA, 400 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, 44429
Received: April 7, 2016, Revised: May 27, 2016, Accepted: June 13, 2016

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

추출, ⁵채광(우라늄 제외), ⁶석유 및 천연가스, ⁷인산염 제조, ⁸지르콘 및 지르코늄, ⁹산화티타늄 안료제조, ¹⁰금속제조(Sn, Cu, Al, Fe, Zn, Pb), ¹¹석탄연소 산업, ¹²수처리산업 등이다(IAEA, 2013).

국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP), 세계보건기구(World Health Organization, WHO) 및 IAEA에서는 각 국가에 계속해서 라돈관리 프로그램을 제정하도록 독려하고 있다. 즉 국가가 주택 및 작업장에 대한 라돈의 강제기준 설정, 건축물에 대한 라돈관리 지침, 신규 건축 시공전 라돈농도조사, 건축자재내 천연방사성원소에 대한 함유농도 제한 등과 같은 정책 등을 시행토록 권고하고 있다. ICRP에서는 권고기준으로서 참조준위(reference levels)란 용어를 사용한다(ICRP, 2007). 참조준위는 모든 피폭상황(계획1/기준2/비상3) 피폭상황)에서 방사선방호 최적화를 달성하기 위하여 하나의 선원 또는 행위로부터 개인선량이 부당하게 높아지는 것을 방지할 목적으로 설정하는 선원중심의 상한치를 말한다. 즉 한도량은 아니나 정해진 준위를 초과하는 경우에 그 준위에 따라 사전에 계획된 일정한 절차를 취하기 위해 설정되는 기준이다.

유럽위원회(European Commission, EC)는 1990년 주택의 라돈에 대한 가이드라인을 발표했다. 1996년에는 작업장에서의 라돈 노출에 대한 기준 및 모니터링에 대한 조치 및 요구사항을 정하였다. 이러한 라돈 문제에 대해 대규모 정책이 수립, 시행되고 라돈에 대한 참조준위를 법률로 제정하여 라돈 정보에 대한 상당한 노력들이 추진되었다(EC, 1999).

라돈(²²²Rn)은 방사성물질이므로 라돈노출은 방사선량과 관계가 있다. 라돈에 대한 건강위험을 나타내는 두가지 개념으로 라돈 농도(concentration)와 라돈 선량(dose)이 있다. 라돈 농도의 단위는 Bq/m³를 사용하고 라돈 선량은 대개 mSv로 표현한다. 라돈 농도

와 라돈 선량은 다른 두 물리량으로 라돈 노출에 대한 선량을 평가하기 위해서 환산계수(conversion factor)를 사용한다. 라돈의 선량환산계수(Dose conversion factor)⁴⁾는 권고기관 및 연구자에 따라 다양하며 약간씩 다르게 예측하고 있다(Jing, 2005).

주택과 작업장에서 라돈 및 라돈 붕괴산물에 노출되었을 때 가장 큰 위험은 전리방사선 피폭일 것이다. 그 위험은 라돈 및 그 붕괴산물의 노출로 인해 매년 암으로 수천명이 사망하는 것으로 보고하고 있다. 그러나 합리적인 비용으로 라돈에 의한 방사선 위험을 줄임으로써 많은 생명을 구할 수 있다. 이러한 목표를 달성하기 위해서는 국가 기관이 라돈 노출을 제한하고, 위험이 큰 곳에 대한 조치를 제도화하고 가이드라인을 제정하며 라돈과 관련된 위험에 대해 근로자에게 알리는 것이 중요하다.

현재 우리나라에는 근로자의 건강을 보호하기 위한 라돈에 대한 노출기준이 마련되어 있지 않다. 본 연구는 라돈과 관련된 연구가 활발히 이루어지고 있는 유럽 및 미국, 캐나다 등 북아메리카와 아시아의 라돈 가이드라인을 조사하여 우리나라의 라돈 노출 기준 설정에 필요한 기초자료를 제공하는데 목적이 있다. 이를 위해 먼저 라돈에 대해 가이드라인을 설정하고 있는 선진 각국 및 기관들을 조사하고 이를 토대로 우리 실정에 맞는 노출기준을 제시할 필요가 있다고 생각된다.

II. 연구내용 및 방법

국내 각 부처에서 라돈과 관련된 현행 법령의 내용을 파악하고 가이드라인이 설정된 세부항목을 검토하였다. 세계 각국에서 라돈에 대한 가이드라인을 설정하고 있는 EU 국가 24개국, 아시아 6개국, 북아메리카 2개국 등 총 32개 국가를 조사대상으로 하였다.

라돈에 대한 가이드라인 조사는 각 국가에서 라돈에 대한 참조준위와 관련된 정보를 습득하기 위해 해당국가 관련 정부 및 연구기관과 관련 사이트를 검색하였고 관련 연구를 수행한 논문을 수집하여 최근

- 1) 방사선원의 의도된 도입과 운영에 따른 피폭상황으로서 일어날 것으로 예상한 정상피폭 및 잠재피폭을 말함.
- 2) 자연백그라운드 방사선에 의해 발생하는 경우처럼, 관리를 결정해야 할 시점에 이미 존재하고 있는 피폭상황. 기존피폭상황에는 환경방사선 피폭, 천연방사성물질(NORM) 피폭, 환경잔류물 피폭, 원자력 사고나 방사선 사건에 기인한 오염구역에서 피폭 등이 있음.
- 3) 계획피폭상황의 운영 중 발생할 수 있거나 악의적 행위의 결과 등 예상치 못한 상황으로서, 긴급한 조치가 필요한 상황. 참조준위의 설정을 포함한 비상시 방호전략이 개발되었음을 '국기관'이 입증해야 하는 피폭상황을 말함.

- 4) 라돈 흡입에 의한 방사선 피폭선량을 유효선량으로 환산한 값으로 내가 1 Bq(베크렐)의 방사능을 먹었을 때 평생 받게될 유효선량이 몇 Sv(시버트)인가를 의미하는 계수임. 이 계수는 핵종에 따라 다르며 동일핵종이더라도 호흡을 통하느냐, 아니면 구강을 통하느냐에 따라 달라짐.

공개하고 있는 내용으로 업데이트 하였다. 각국의 가이드라인을 고찰함에 있어 두가지 측면을 고려하였다. 즉 건축자재 등을 통해 라돈이 발생하는 사무실 등에서 일상적으로 근무하는 근로자에 대한 참조준위와 지하철, 터널, 원료물질, 공정 부산물 등에 방사성물질이 함유되어 있어 이를 직접 취급함으로써 라돈에 노출될 수 있는 장소에 근무하는 근로자에 대한 노출기준으로 구분할 수 있다.

참조준위가 법률 및 규정 등으로 명시하고 구속력 있는 법적 성격을 가질 때에는 강제기준(mandatory or enforced reference levels)으로, 참조준위가 법적 구속력은 없지만 라돈농도를 줄이기 위해 자율적인 개입(intervention)이 필요한 경우에는 권고기준(advisory reference levels)으로 표현하였다. 노출기준은 고용노동부 고시 제2013-38호 「화학물질 및 물리적 인자의 노출기준」 제2조 1항에서 그 사전적 의미를 찾을 수 있다(MoEL, 2013).

III. 연구결과

1. 국내

라돈이 실내공기질을 관리하는 차원에서 대상물질로 규정한 것은 1996년 환경부 「지하생활공간 공기질관리법」에서 처음으로 언급되었고 이 법은 2003년 「다중이용시설등의 실내공기질관리법(이하 ‘다중법’이라 한다)」으로 개정하였으며, 적용대상도 종전 지하역사, 지하상가의 2개 시설군에서 도서관, 의료기

관, 여객터미널 등 15개 시설군을 추가하여 17개 시설군으로 확대하였다(ICKL, 2014). 관리오염물질도 10가지 항목으로 확대하고, 오염물질에 따라 유지기준과 권고기준으로 나누어 적용대상건물이 이 기준을 의무적으로 유지하도록 규제함으로써 실내공기질을 보다 체계적으로 관리하는 계기가 되었다. 교육부에서는 학교에 대해 PM₁₀, 라돈, TVOC 등 12개 항목에 해당하는 오염물질을 규정하였고 고용노동부 및 보건복지부도 PM₁₀, 이산화탄소, 일산화탄소 등에 대한 오염관리 대상물질을 규정하였지만, 라돈 항목은 제외되어 있다(ICKL, 2012; ICKL, 2013). 국토교통부에서는 다중법에 포함되지 않은 면적이 2,000 m² 이하인 주차장에 대해 일산화탄소 오염관리 및 적절한 조도를 유지토록 규정하고 있다(ICKL, 2009).

이와 같이 라돈에 대한 가이드라인은 주요 관리대상인 환경부의 다중이용시설 등과 교육부의 학교 등에 대해서는 권고기준이 설정되어 있지만 제조업 사업장내 사무실 근로자 및 직업을 보호하기 위한 라돈의 노출기준은 없었다(ICKL, 2012). Table 1에 고용노동부, 환경부, 교육부, 보건복지부, 국토교통부 등 5개 부처에서 관리하고 있는 실내 공기질 관련 대상시설 및 측정항목을 요약하였다.

2. 국외

1) 주택

기존 주택(existing dwellings)에 대한 라돈 가이드라인이 설정된 유럽연합국가(28 개국)중 24개 국가

Table 1. Indoor Air Quality management system and measurement items in Korea

Government relations	Basis of laws	Objects of application	Pollutants
Ministry of Employment & Labor	Occupational Safety and Health Act	Office, Workplace	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), CO ₂ (ppm), CO(ppm), NO ₂ (ppm), Formaldehyde($\mu\text{g}/\text{m}^3$), Total airborne bacteria (CFU/ m^3), TVOC($\mu\text{g}/\text{m}^3$), Asbestos(fibers/cc), O ₃ (ppm)
Ministry of Environment	Indoor Air Quality Control in Public Use Facilities, Etc. Act	Public use facilities, Newly-built collective housing	- Standards for Maintenance : PM ₁₀ , CO ₂ , CO, Formaldehyde(HCHO), Total airborne bacteria - Standards for Recommendation : NO ₂ , Radon(Bq /m ³), TVOC, Asbestos, O ₃
Ministry of Education	School Health Act	School	PM ₁₀ , CO ₂ , HCHO, Total airborne bacteria, Falling bacteria, CO, NO ₂ , Radon, TVOC, Asbestos, O ₃ , Mite
Ministry of Health and Welfare	Public Health Control Act	Public utilization facilities	PM ₁₀ , CO, CO ₂ , HCHO
Ministry of Land, Infrastructure, and Transport	Parking Lot Act	Parking lot (less than 2,000 m ²)	CO, Illumination

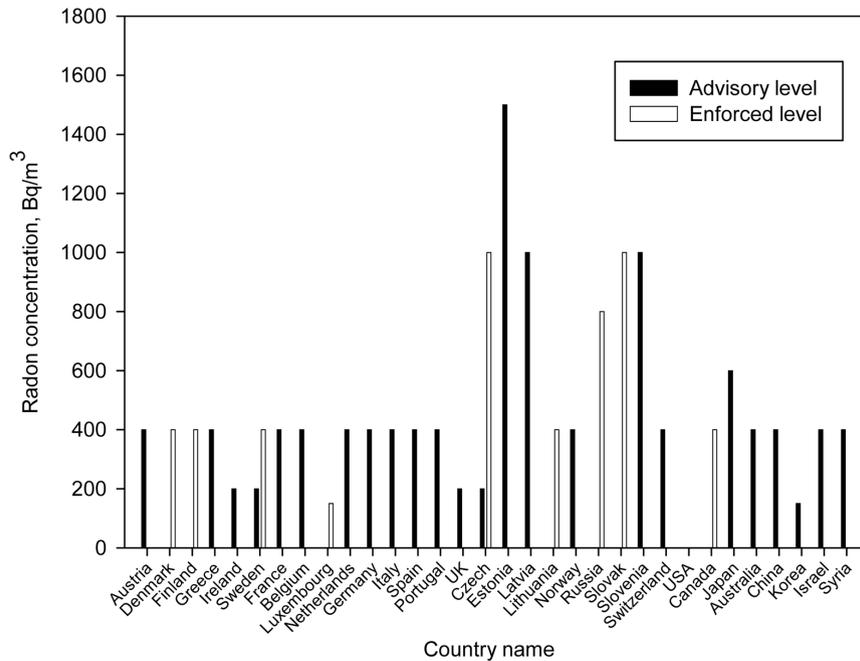


Figure 1. Radon reference levels for dwellings or Public use facilities

를 조사한 결과, 과거 서구 유럽국가인 오스트리아 (Austria), 벨기에(Belgium), 덴마크(Denmark), 핀란드 (Finland), 독일(Germany), 그리스(Greece), 아일랜드 (Ireland), 룩셈부르크(Luxembourg), 스웨덴(Sweden), 영국(United Kingdom) 등의 주택에 대한 가이드라인 범위는 150~400 Bq/m³로 나타났고 동구 유럽국가인 체코(Czech Republic), 에스토니아(Estonia), 라트비아, 리투아니아(Lithuania), 슬로바키아(Slovak Republic), 슬로베니아(Slovenia) 및 러시아(Russia) 등의 주택에 대한 가이드라인 범위는 200~1,500 Bq/m³로 비교적 큰 편이다(Figure 1). 이들 유럽연합국가의 약 67%가 기존주택에 대한 가이드라인으로 400 Bq/m³를 설정하고 있었으며 룩셈부르크, 핀란드, 노르웨이, 스웨덴 및 러시아 등은 강제기준을 채택하고 있었다. 반면에 신규주택(new dwellings)에 대해서는 기존주택 보다는 더 강화된 권고기준(200 Bq/m³)을 적용하는 나라가 많았다(Gustav, 1999).

미국 및 캐나다에서는 권고기준으로 기존 및 신규 주택에 대한 구분없이 각각 150 Bq/m³ 및 200 Bq/m³를 설정하고 있었고 아시아에서는 호주 및 이스라엘이 기존 및 신규주택에 대한 구분없이 200 Bq/m³를, 중

국은 기존 및 신규주택에 대해 각각 400 Bq/m³ 및 200 Bq/m³를, 일본에서는 ICRP-60에서 권고하는 참조 준위(600 Bq/m³)를 준용하고 있는 것으로 조사되었다.

유럽연합국가 대부분이 정부 또는 관련 부처에서 주택의 라돈에 대한 명령 및 권고사항에 대한 감독 뿐만 아니라 규정 등에 대한 이행여부까지 확인하는 것으로 나타났다. 핀란드, 스웨덴 및 영국에서는 지방자치당국이 감독에 대한 책임을 갖고 있었다. 러시아, 라트비아, 리투아니아, 슬로바키아, 스위스 등은 방사선 방호를 위한 감독책임을 규제기관이 맡고 있었다. 노르웨이에서는 지방자치단체에서 라돈 관련 규정을 감독하고 있었고 미국의 라돈 프로그램은 대부분 자발적으로 이루어지며 캐나다에서는 천연방사능에 대한 관리를 지방정부가 관할해야 할 공중보건 문제로 보고 있었다.

2) 작업장

EC는 방사선 방호 88(Radiation Protection 88) 보고서에서, 작업장의 라돈에 대한 가이드라인으로 평균 라돈가스농도를 500~1,000 Bq/m³ 범위로 설정하도록 권고하였다. 이것은 연간 2,000 시간동안 직업

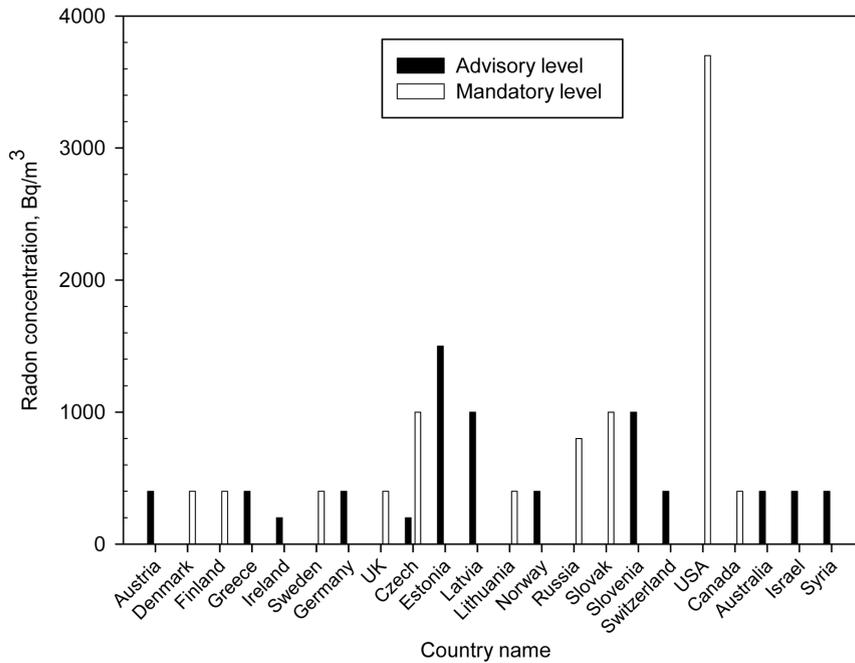


Figure 2. Radon reference levels for workplaces

적 노출 및 약 0.4의 평형상수⁵⁾에 근거한 것이다(EC, 1999).

유럽연합국가 16개 국가를 조사한 결과, 작업장에 대한 라돈의 직업인 가이드라인으로 약 75%가 400 Bq/m³ 이하로 설정하여 강제 및 권고기준으로 사용하고 있었다(Figure 2). 오스트리아, 그리스, 노르웨이 및 독일은 권고기준으로 400 Bq/m³를, 덴마크, 스웨덴 및 핀란드 등은 강제기준으로 400 Bq/m³를 규정하고 있었다. 그러나, 신축 작업장에 대해서는 좀 더 강화된 기준을 제시하고 있었다. 즉 오스트리아, 아일랜드, 그리스 및 스웨덴이 200 Bq/m³로 설정하고 있었으며 반면에, 동유럽국가들은 국가에 따라 차이가 있으나 대부분 ICRP(2007)에서 2007년 권고했던 직업인의 공기중 라돈 참조준위인 1,500 Bq/m³를 최고한도로 하여 400~1,500 Bq/m³ 범위내에서 규제하고 있었다.

5) 평형상수(Equilibrium factor, F)는 고려대상인 대기의 모핵종 라돈 동위원소의 방사능 농도와 딸핵종 라돈붕괴산물의 방사능 농도사이의 비를 말함. 실내로 유입된 라돈농도가 동일한 두공간(A,B)이 있다고 할 때, A공간의 평형상수가 더 높다면 라돈 딸핵종들의 농도가 B공간보다 상대적으로 높다는 것을 의미하므로 인체에 미치는 영향이 더 크게 됨.

미국 산업안전보건청(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)은 작업장에 대한 라돈의 허용기준(Permissible Exposure Limits, PEL)으로 미국 원자력위원회(Nuclear Regulatory Commission, NRC)에서 권고하는 기준을 준수하여 주 40시간 7일 연속 평균농도로 100 pCi/L(3,700 Bq/m³)를 설정하고 있었다(OSHA, 2008). 캐나다는 유럽연합과 마찬가지로 400 Bq/m³를 설정하고 있었다. 이들 두 나라는 법적인 강제기준으로 규정하고 있었다.

반면에, 아시아에서는 일본의 경우 작업장에 대한 라돈의 가이드라인은 설정되어 있지 않았고 호주 및 이스라엘은 작업장 가이드라인으로 400 Bq/m³를 권고하고 있었다.

유럽연합국가내 대부분의 정부 또는 관련 부처는 주택에서와 마찬가지로 작업장의 라돈에 대한 명령 및 권고사항의 준수를 감독할 뿐만 아니라 법률 및 권고사항의 이행여부도 확인하고 있었다. 덴마크 및 핀란드에서는 국가 방사선 방호기관이 규제기관으로 지정되어 라돈관리 이행에 대한 감독책임을 가지고 있었고 스웨덴에서는 산업안전보건 국가위원회가 규정을 만들고 지방자치당국이 산업안전보건에 대한

실제적인 감독을 수행하는 것으로 조사되었으며 스위스는 국립 상해보험기구(Swiss National Accident Insurance Organization, Suva)에서 규정 이행을 감독하고 있었다. 마찬가지로 동구권의 유럽국가 대부분의 정부가 법률과 권고사항을 이행할 뿐만 아니라 이행을 감독하고 있었다.

미국의 라돈관리 프로그램은 대부분 자발적이지만, 주정부에 따라 다르고 작업장에 대한 기준은 OSHA, 광산안전보건청(Mine Safety and Health Administration, MSHA) 및 에너지부(Department of Energy)에서 관리하며 노르웨이 및 캐나다에서는 천연방사능에 대한 관리를 지방자치단체 또는 지방정부가 라돈 관련 규정을 감독하고 책임을 가지고 관리하고 있었다. 미국 환경보호국(Environmental Protection Agency, EPA)는 일반 대중에게 라돈에 관한 정보를 알리거나 주택 등의 라돈 대책을 촉진하는 라돈 문제에 대한 전반적인 책임을 갖고 있었다(EPA, 2003).

또한, 유럽국가중 프랑스, 핀란드, 독일, 노르웨이 및 아일랜드는 작업장에서 라돈 측정을 위한 프로토콜(protocols)을 가지고 있었고 아시아에서는 이스라엘 등이 측정지침을 가지고 있는 것으로 조사되었다.

IV. 고 찰

라돈에 대한 가이드라인 설정은 주택 또는 다중이용시설에 대해서는 동유럽국가를 제외하고 대부분 150~400 Bq/m³ 범위에서, 작업장에 대해서는 미국 및 에스토니아를 제외하고 대부분 200~1,000 Bq/m³ 범위에서 권고하거나 강제로 규제하고 있는 것으로 조사되었다. 이들 대부분의 국가들이 주택과 작업장을 구분하여 가이드라인을 설정하고 있었다. 가이드라인을 설정함에 있어 피폭시간은 일반적으로 일반인의 경우 7,000시간, 직업인의 경우 2,000시간을 기준으로 하고 있다(ICRP, 2010).

OSHA의 PEL은 8시간 가중평균 노출을 근간으로 하지만 NRC의 최대허용농도(Maximum Permissible Concentration, MPC)는 주당 40시간을 근본으로 하고 있다(OSHA, 2008). 미국 NRC에서 라돈 및 라돈 딸핵종에 대한 유도공기중농도(Derived Air Concentration, DAC)⁶⁾는 0.33 WL 또는 30 pCi/L(평형상수 F=1.0 일

때)를 제시하고 있고 연간 흡입섭취한계(Inhalation annual limit of intake, ALI)는 4 WLM⁷⁾로 정하고 있다(ATSDR, 2012; NRC, 2015). OSHA에서 규정하고 있는 라돈에 대한 노출기준이 다른 나라에 비해 높은 편이지만, 사업주가 NRC 기준인 성인 근로자에 대한 연평균 노출한계 30 pCi/L를 준수하고 있다면, 이 기준을 OSHA는 최소 허용 위반(a de minimis violation)으로 고려할 수 있다고 되어 있다(OSHA, 2002). 또한, 미국 산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)에서는 라돈 및 그 딸핵종에 대한 노출기준(Threshold Limit Values, TLVs)으로 4 WLM을 설정하고 있다. 이 값은 방사선작업 종사자의 연간 유효선량 한도인 20 mSv와 같은 값이다(ACGIH, 2014).

국제적인 권고기관인 ICRP 및 유엔과학위원회(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR)에서는 라돈에 의한 인체의 영향을 표현하기 위해서 라돈농도를 라돈선량으로 환산하여 설명하고 있다.

전리방사선의 선량한도는 일반인이나, 직업인 즉 종사자이냐에 따라 다른데, 일반인의 경우 선량평가에 대한 제반 영향인자, 즉 피폭경로, 방사성핵종의 공간분포, 피폭시간 등 습관자료, 적절한 선량계수 등을 고려하여 설정된 것이다. 선량한도는 계획피폭 상황에서 모든 선원 또는 행위로부터 받은 선량의 합을 제어할 목적으로 설정하는 개인중심의 상한치이며, 방사선방호 최적화에 실패하였을 때 마지막 보루의 역할을 한다. ICRP는 일반인에 대한 기준 설정 시 계획된 시설이든 기존피폭상황이든 확률론적 개인선량 평가에서는 집단에서 임의로 추출한 사람이 대표인보다 큰 선량을 피폭할 확률이 5%보다 작도록 대표인을 정의하도록 권고하고 있다. 계획피폭 상황에서 일반인 피폭의 경우, 선량한도를 연간 유효선량 1 mSv로 권고하고 있고 직업인 피폭의 경우에는 어느 한 해 동안 받은 유효선량이 50 mSv를 초과하지 않는 범위에서 지정된 5년 동안 평균하여 연간

흡입할 경우 방사능 섭취량이 연간섭취한도에 이를 것으로 보이는 공기중의 농도를 말함.

7) WLM(Working Level Month)은 1 WL 농도의 공기를 한달 작업시간인 170 시간 호흡한 누적 피폭량으로 WL(Working Level)은 공기 1 L에 1.3x10⁵ MeV의 잠재 알파 에너지를 내는 임의 조합의 수명이 짧은 라돈자손 농도를 말함. 1WL = 2.08x10⁻⁵ J/m³

6) 유도공기중농도(DAC, Bq/m³)는 방사선작업종사자가 1년동안

Table 2. Relative risk of lung cancer by smoking status and average radon concentration

Smoking status	Average radon concentration, Bq/m ³		
	<25 Bq/m ³	100 Bq/m ³	400 Bq/m ³
Nonsmoker	1.0	1.2	1.6
Continuing smoker(15~24 cigarettes per day)	25.8	29.9	42.3

20 mSv(5년 동안 100 mSv)의 유효선량⁸⁾을 선량한도로 정하고 있다(ICKL, 2015). 일반적으로 작업자의 참조준위(선량제약치)는 선량한도를 초과하지 않는 범위에서 ‘운영자’가 설정하며, 일반인의 참조준위는 ‘규제기관’에서 설정한다.

광부를 대상으로 한 역학연구와 실내를 기준으로 한 연구로부터 얻은 결과를 비교하는 것은 간단하지 않는데 주로 서로 다른 역학설계 및 피폭척도(광산은 WLM, 주택은 라돈농도 Bq/m³)이기 때문이다. 광부연구, 즉 코호트연구(cohort study)는 개인라돈피폭의 누적시간에 걸친 분포를 고려하므로 연령과 피폭 후 경과시간의 수정효과를 고려할 수 있는 장점이 있지만 종종 흡연과 같은 보조인자 영향을 고려할 수 없다는 단점이 있다. 주택에 대한 환자-대조군연구(case-control study)는 많은 잠재적 보조인자에 대한 상세한 정보를 제공하는 장점은 있지만 지난 수십년 이전의 라돈농도를 평가하기 위해 당시 상황에 적합한 척도를 사용해야 하는 단점이 있다. 질병의 발생과 위험인자의 연관성을 설명하는 지표로 코호트연구는 상대위험도(relative risk, RR)⁹⁾로, 환자-대조군연구는 교차비 또는 승산비(odds ratio)¹⁰⁾로 표현한다. 광산에서 주택으로 외삽에는 여러 인자가 고려되어야 하는데, 여기에는 선량-반응관계의 선형성, 성인 남자의 위험과 여성과 아동을 포함하는 일반인 집단의 위험의 가능한 차이, 비소, 석영, 디젤 배기가스 등을 포함한 다른 환경 피폭의 차이, 라돈과 단수명 자손 사이 평형상수 F값의 차이, 호흡률 차이 등이 있다.

8) 유효선량이란 방사선에 피폭한 사람의 종합적인 위험도를 정량적으로 평가하되 실무에서 다루기에 용이하도록 만들어진 단일 값으로 유효선량 값은 방사선의 종류(알파, 베타, 감마, 중성자 등)에 따른 위험도 차이, 각 장기나 조직의 압에 대한 상대적 민감도까지 고려해서 만들어진 값. 따라서 유효선량은 측정 가능한 값이 아니며 계산 등을 통해 산출된 값

9) 상대위험도란 위험인자가 있는 경우 질병이 발생하는 비율과 위험인자가 없는 경우 질병이 발생하는 비율의 비를 말함.

10) 교차비는 질병이 있을때의 승산(odds)와 질병이 없을때의 승산의 비를 말함.

ICRP 65에 따르면, 연간 7,000시간 노출과 F=0.4를 가정했을때, 1 Bq/m³ 라돈가스농도는 4.40x10⁻³ WLM의 실내라돈에 피폭되고 있다고 발표하였다(ICRP, 1993). 그러므로, 30년 기간(즉 진단전 최종 35년에 5년의 지연시간 있음)과 100 Bq/m³ 시간가중평균농도를 고려하고 누적노출 2.1x10⁷ Bq·h/m³, 평형상수 F=0.4, 점유율 80%를 가정하면, 누적피폭은 약 13 WLM에 해당하는 것으로 계산되었다. 단위 피폭당 폐암에 대한 상대위험도는 유럽, 북미 및 중국에서 각각 100 Bq/m³ 당 1.08, 1.11 및 1.13 이었고(UNSCEAR, 2000), 유럽의 통합분석에서는 생애 무흡연자의 경우 100 Bq/m³ 당 교차비는 1.11(95% CI 1.00-1.28)이었으며 미국의 통합분석에서는 비흡연자의 교차비는 같은 수준(1.10)이었으나 유의하지 않았다(95% CI 0.91-1.42). UNSCEAR 2006 보고서에 따르면, 정밀한 개인누적 피폭평가가 있는 환자군과 대조군을 집중분석했을때 선형의 선량-반응관계 기울기는 100 Bq/m³ 당 1.11 이었다(UNSCEAR, 2009).

이와 같이, 광부에 대한 코호트 연구와 주택 라돈 피폭에 대한 환자-대조군연구로 부터 라돈이 폐암을 초래할 수 있는 증거가 확실하다는 결론에 도달하였으나 폐암 외 고형암이나 백혈병에 대해서는 라돈 피폭과 관련한 어떠한 초과위험의 존재에 대해서는 증거가 미약하다는 결론을 내렸다. 즉 유럽, 미국 및 중국의 주택에 대한 환자-대조군 연구에서는 라돈농도 100 Bq/m³ 증가에 대해서 폐암위험이 적어도 8~13% 증가한다고 보고하였다(Darby et al., 2005). 또한, Table 2에서 비흡연자에서 75세 까지 누적 폐암 위험은 라돈농도 0(<25 Bq/m³), 100 Bq/m³ 및 400 Bq/m³에서 각각 0.4%, 0.5% 및 0.7% 인 것으로 평가되었으며 일생 흡연자에서의 폐암위험은 각각 10%, 12% 및 16% 로 증가하며 비흡연자의 폐암발생 상대 위험도의 거의 26배인 것으로 나타났다(Darby et al., 2006).

라돈에 대한 방사선 방호기준 설정은 초기에는 폐

Table 3. Estimated dose conversion factors for indoor radon exposure

Source	Estimated annual effective dose per 37 Bq/m ³	Estimated effective dose per WLM	Estimated annual effective dose per 100 Bq/m ³
ICRP	0.8 mSv	4.8 mSv	2.2 mSv
UNSCEAR	0.9 mSv	5.5 mSv	2.4 mSv
NCRP	1.7 mSv	10 mSv	4.6 mSv
Porstendöfer	0.7~3.0 mSv	4.2~18 mSv	1.9~8.1 mSv

암발생 위험보다는 유효선량 개념을 적용하였다. 라돈은 관리 가능한 선원으로서 라돈 노출에 대한 유효선량은 설정된 방어표준과 일치되도록 측정량, 단위체적당 침적에너지, 그리고 방사선 종류 및 피폭된 조직의 감수성과 관련된 인자 등을 고려하여 추정하였다.

선량환산계수는 폐에 침적된 공기중 라돈 딸핵종의 방사능으로부터 흡수선량을 계산한 선량계측모델을 근거로 추정할 수 있다. 이 계수의 영향변수로는 기후조건, 방사능입자 크기 분포, 침적인자(deposition parameters) 등이 있다. Porstendöfer(2001)의 연구에 따르면, 라돈농도 37 Bq/m³이고 점유율(occupancy rate)이 80%인 주거지에서 생활한다면 유효선량은 0.7~3 mSv인 것으로 추정하였다. 등가 선량환산계수는 원폭피해자의 상해위험 및 인체 역학 연구로부터 모델화한 라돈관련 위험을 기초로 만들어졌다. 가장 최근에 발표된 선량환산계수는 F=0.4인 환경에서 0.8 mSv / 37 Bq/m³ 이었다(ICRP, 2010). UNSCEAR에서는 2000년 선량환산계수로 0.9 mSv / 37 Bq/m³를 권고하였고(UNSCEAR, 2000), 미국 방사선방호측정심의회(National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP)에서는 선량계측모델을 근거로 선량환산계수로 1.7 mSv / 37 Bq/m³를 권고하였다(NCRP, 2009). Table 3에 제시한 선량환산계수값은 F=0.4, 점유율 80%를 가정하여 산출한 것이다.

미국 EPA에서 권고하고 있는 주택에 대한 권고기준 150 Bq/m³은 가장 최근에 발표된 유효선량 추정값의 범위로 환산하면 3~7 mSv/y이다(EPA, 2003). 그러므로, 라돈을 줄일 수 있는 어떤 프로그램의 감축목표가 75 Bq/m³라면 관리 가능한 방사선원에 대한 일반인의 선량한도 1 mSv/y까지 낮출 수 있다. 따라서, 주택에 대한 권고기준 150 Bq/m³를 사무실에 대한 라돈의 권고기준으로 채택하여도 무리가 없을 것 같다

(HPS, 2009).

라돈 및 라돈 딸핵종에 대한 시간당 평형등가농도(Equilibrium Equivalent Concentration, EEC)로서 직업적 노출농도 1 Bq/m³는 ICRP에서 권고하는 위원회 유효선량(a committed effective dose) 8 nSv와 일치한다. 토론의 경우는 36 nSv와 같다. 그러므로, 유효선량 20 mSv는 라돈에 대해서는 4 WLM와 같은 값이고 14 mJ·h/m³ 또는 2.5 x 10⁶ Bq·h/m³ 와 동일한 값이다. 또한, 이 값을 공기중 라돈농도 단위인 Bq/m³으로 환산하면, 연간작업시간 2,000 hr, 평형상수 0.4, 선량환산계수 8 nSv를 적용했을 때, 약 3,000 Bq/m³가 된다. UNSCEAR에서 정한 기준에 따른다면, 유효선량 20 mSv는 2,700 Bq/m³가 되고 NCRP 기준에 따르면 1,500 Bq/m³가 된다.

ICRP에서 권고하는 작업장에 대한 참조준위 1,000 Bq/m³는 유효선량 추정값의 범위로 6~14 mSv/y에 해당하며 이 값은 ICRP에서 직업적 노출을 줄이기 위한 목표값인 10 mSv/y을 포함한다. 각 국가의 라돈에 대한 작업장의 가이드라인을 고찰함에 있어 제한점은 작업장(workplace)으로 분류된 대상작업이 방사선 작업(radiation work), 예를 들면 지하공간이나 방사성물질을 취급하는 산업공장 등을 포함하는지 국가마다 차이가 있어 명확히 구분할 수 없었다.

V. 결 론

라돈에 대한 가이드라인을 권고하고 있는 주요 국제기관, 즉 ICRP, UNSCEAR 및 NCRP에서 제시한 선량환산계수를 연간유효선량으로 분석한 결과, 주택에 대한 라돈의 권고기준 150 Bq/m³는 일반인에 대한 연간선량한도 1 mSv 보다 높은 수치이었고 작업장에 대한 라돈의 참조준위 1,000 Bq/m³는 방사선작업 종사자에 대한 연간선량한도 20 mSv 보다 낮은 수치이었다. 현재 우리나라는 실제 산업현장에서의

라돈에 대한 직업적 노출과 관련한 연구자료가 부족한 편이다. 이러한 연구자료의 축적을 통해 라돈에 대한 감축목표를 더 낮게 설정해야 할지 검토해야 할 것이다. 감축목표가 낮아지면 동시에 노출기준도 낮아져야 할 것이다.

종합해 보면, 산업안전보건법 적용 사업장의 일반 근로자 및 사무실에 대한 라돈의 권고기준은 미국 EPA 기준 150 Bq/m^3 를 그대로 수용하고 라돈이 발생하는 방사선 작업 및 종사자에 대한 노출기준은 유럽 연합 대부분의 국가에서 채택하고 있는 권고 및 강제 기준 400 Bq/m^3 에서 ICRP의 참조준위 값 $1,000 \text{ Bq/m}^3$ 사이에서 정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 산업안전보건연구원의 지원을 받아 수행된 연구임(2015-연구원-1130)

References

- ACGIH(American Conference of Governmental Industrial Hygienists). Threshold Limit Values(TLVs) for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices(BEIs). Cincinnati, OH, ACGIH, 2014. p.176-177
- ATSDR. Toxicological profile for radon. U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Service. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Atlanta, GA. 2012. Available from: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp145.pdf>
- Darby S, Hill D, Auvinen A. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case - control studies. *Br. Med. J.* 2005; 330:223-27
- Darby S, Hill D, Deo H. Residential radon and lung cancer - detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiological studies in Europe. *Scand. J. Work Environ. Health*, 2006; 32(1):1-4
- EC. Radiological Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials. Office for Official Publications of the European Communities: RP 112. Luxembourg, 1999
- EPA(U.S. Environmental Protection Agency). EPA assessment of risks from radon in homes. Washington, DC: EPA; 402-R-03-003; 2003. Available at: <http://www.epa.gov/radiation/docs/assessment/402-r-03-003.pdf>.
- Gustav Åkerblom. Radon Legislation and National Guidelines. Swedish Radiation Protection Institute. SSI reports, 1999
- Health Physics Society(HPS). Background information on Update on Perspectives and Recommendations on Indoor Radon. Position Statement of the Health Physics Society. McLean, VA: HPS; 2009
- IAEA. Naturally Occurring Radioactive Material(NORM IV, V, VI, VII). Safety Reports Series: No.78 IAEA Vienna, 2013
- IARC. IARC Monographs on the Carcinogenicity of Chemicals to Humans. 2015. Available from: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/>
- ICRP. Protection against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65: ICRP 23(2), 1993
- ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103: ICRP 37(2-4), 2007
- ICRP. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115: Ann. ICRP 40(1), 2010
- Information Center of Korea Laws. Parking Lot Act. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport. 2009
- Information Center of Korea Laws. School Health Act. Ministry of Education. 2010
- Information Center of Korea Laws. Occupational Safety and Health Act ; Guidelines of Indoor Air Quality Control in Offices. 2012. Ministry of Employment & Labor. 2012
- Information Center of Korea Laws. Public Health Control Act. Ministry of Health and Welfare. 2013
- Information Center of Korea Laws(ICKL). Indoor Air Quality Control in Public Use Facilities, Etc. Act, Ministry of Environment. 2014
- Information Center of Korea Laws. Nuclear Safety Act. Nuclear Safety and Security Commission. 2015
- Jing Chen. A Review of Radon Doses. *Radiation Protection Management*, 2005; 22(4):27-31
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Exposure Limits for Chemical Substances and Physical Agents(MoEL Public Notice No. 2013-38). 2013
- NCRP(National Council on Radiation Protection). Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States. NCRP Report No.160, 2009
- NRC(U.S. Nuclear Regulatory Commission). NRC

- Regulations - Title 10, Code of Federal Regulations. 2015. Available from: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/>
- OSHA. Letter to Ms. DeWitte concerning occupational exposure to radon gas. Occupational Safety and Health Administration. 2002. Available from: https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=INTERPRETATIONS&p_id=24496
- OSHA(Occupational Safety and Health Administration). Radon in Workplace Atmospheres. 2008. Available from: <https://www.osha.gov/dts/sltc/methods/inorganic/id208/id208.html>
- Porstendörfer, J. Physical Parameters and Dose Factors of the Radon and Thoron Decay 1570 Products. *Radiat. Prot. Dosim.* 2001; 94(4):365-373
- UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations, New York, 2000
- UNSCEAR, UNSCEAR 2006 Report. Annex E. Sources-to-Effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces. New York: United Nations, 2009
- WHO, WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. WHO Press, Geneva, 2009